

EDUARDO HÉLDER INÁCIO FERREIRA VIEIRA

**GRELHAS ESTRUTURAIS DE ELEMENTOS TUBULARES PARA  
APLICAÇÃO EM ESTRUTURAS SECUNDÁRIAS DE NAVIOS**

Lisboa

**2010**

**UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial

**GRELHAS ESTRUTURAIS DE ELEMENTOS TUBULARES PARA  
APLICAÇÃO EM ESTRUTURAS SECUNDÁRIAS DE NAVIOS**

EDUARDO HÉLDER INÁCIO FERREIRA VIEIRA

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade  
Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Doutor Rui Fernando Martins (FCT/UNL-DEMI)

Co-orientador: CTEN Eng. Pires da Silva (Direcção de Navios, Marinha Portuguesa)

Lisboa

**2010**

## **Agradecimentos**

Gostaria de agradecer em primeiro lugar ao Professor Rui Fernando Martins do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial (DEMI) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT/UNL) por ter sido o meu orientador neste trabalho e por toda a ajuda e motivação que me deu no decorrer do mesmo.

Gostaria de agradecer também ao CFR Engº António Mateus e ao CTEN Engº Pires da Silva da Direcção de Navios da Base Naval de Lisboa por toda a disponibilidade e apoio.

Gostaria de agradecer à minha família pelo constante apoio ao longo dos meus anos de universitário, sem os quais nada disto seria possível.

Gostaria de agradecer à Rute pela partilha dos bons e maus momentos, e pela força e motivação incondicionais.

Gostaria de agradecer por fim a todos os meus amigos pelo companheirismo.

## **Resumo**

O objectivo deste trabalho visa analisar a possibilidade de implementar grelhas de elementos tubulares em estruturas secundárias de navios, de forma a reduzir a massa da estrutura e consequentemente do navio, melhorando o seu desempenho e os consumos.

Consiste no estudo da substituição dos perfis existentes que suportam o convés de voo de uma fragata da classe “Vasco da Gama” da Marinha Portuguesa, simulando o efeito da aplicação de um carregamento de impacto provocado pela aterragem de emergência de um helicóptero “Super Lynx 300” sobre o convés de voo da fragata.

O trabalho foi realizado com base no Método dos Elementos Finitos (MEF), tendo sido utilizado o programa ANSYS® para modelar o convés de voo actual com toda a subestrutura que o suporta, como também outras configurações da mesma, com o objectivo de se obter um compromisso entre resistência e menor massa.

Foram feitos vários estudos com a aplicação da carga em diferentes zonas do convés de forma a caracterizar a distribuição de tensões pelos diferentes elementos que constituem a estrutura, tanto no modelo actual como nos modelos alternativos propostos.

Comparando a distribuição de tensões entre os vários modelos simulados foi possível obter estruturas alternativas com reduções de massa que podem ir até aos 11%, tendo-se concluído que se consegue atingir um nível de resistência equiparável à estrutura actual com uma configuração mais leve.

## **Abstract**

The main purpose of this study intends to analyse the possibility to implement tubular structural elements in ships substructures in order to reduce the weight of the ship and consequently improving its performance and fuel consumption.

The present study consists in the replacement of the existent beams and girders that support the flight deck of a “Vasco da Gama” class frigate operating for the Portuguese Navy and simulates an impact load caused by the crash landing of a “Super Lynx 300” helicopter on the flight deck.

The study was based on the finite elements method and, with the use of ANSYS<sup>®</sup> software, the entire flight deck and support structure were simulated, as well as alternative support structures with the purpose of reaching a compromise between resistance and weight reduction.

Several analyses were made, varying the load application point, in order to determine the stress distribution throughout the different elements of the modelled structures.

Comparing the stress distribution throughout the different models, it was possible to obtain alternative structures with weight reductions that can go up to 11%, allowing to conclude that it is possible to achieve a lighter structure with the same resistance level.

## Índice

|  |      |
|--|------|
| Agradecimentos .....   | i    |
| Resumo .....   | ii   |
| Abstract.....  | iii  |
| Índice de figuras .....  | vi   |
| Índice de tabelas .....  | viii |
| Capítulo 1 - Introdução.....   | 1    |
| 1.1. Objectivos e enquadramento.....   | 1    |
| 1.2. Instituições envolvidas.....  | 1    |
| 1.3. Descrição da organização da tese .....                                      | 2    |
| 1.4. Descrição da fragata, convés e helicóptero.....                             | 2    |
| 1.4.1. Descrição da fragata .....  | 2    |
| 1.4.2. Descrição do helicóptero .....  | 4    |
| 1.4.3. Descrição do convés.....  | 6    |
| 1.4.4. Descrição dos elementos tubulares .....                                   | 7    |
| 1.5. Descrição do Material .....   | 8    |
| 1.6. Factores de segurança .....   | 8    |
| Capítulo 2 – Métodos de cálculo utilizados .....                                 | 10   |
| 2.1. Introdução ao MEF .....   | 10   |
| 2.2. Formulação do MEF .....   | 11   |
| 2.3. Introdução à análise topológica .....                                       | 12   |
| 2.4. Descrição dos elementos finitos utilizados durante a aplicação do MEF ..... | 15   |
| 2.4.1. Elemento barra (LINK 1).....  | 15   |
| 2.4.2. Elemento viga (BEAM 3) .....  | 16   |
| 2.4.3. Elemento tubular (PIPE 16) .....  | 17   |
| 2.4.4. Elemento casca (SHELL63).....   | 18   |
| 2.4.5. Elemento casca SHELL 93 .....   | 19   |
| 2.5. Validação da utilização do MEF.....   | 21   |
| 2.5.1. Análise de uma viga simples.....  | 21   |
| 2.5.2. Análise topológica.....   | 24   |
| 2.5.3. Análise de uma treliça.....   | 26   |

|   |    |
|---|----|
| Capítulo 3 – Determinação das tensões induzidas nas estruturas analisadas ..... | 29 |
| 3.1. Modelação .....  | 29 |
| 3.2. Condições de fronteira .....   | 32 |
| 3.3. Estrutura actual .....   | 35 |
| 3.4. Estruturas alternativas .....  | 37 |
| 3.5. Análise e discussão de resultados .....                                    | 44 |
| Capítulo 4 - Conclusões .....   | 48 |
| Referências bibliográficas .....  | 50 |
| Anexos .....  | 51 |
| Anexo A: .....  | 51 |
| Anexo B: .....  | 53 |
| Anexo C: .....  | 61 |
| Anexo D: .....  | 65 |
| Anexo E: .....  | 66 |

## Índice de figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: Fragata da classe "Vasco da Gama" .....  | 3  |
| Figura 2: Helicóptero "Super Lynx 300" .....   | 4  |
| Figura 3: Dimensões do helicóptero na configuração normal .....  | 5  |
| Figura 4: Dimensões do helicóptero na configuração dobrada .....   | 5  |
| Figura 5: Modelação tridimensional do convés .....   | 6  |
| Figura 6: Modelação tridimensional do convés (sem antepara) .....  | 6  |
| Figura 7: Um Procedimento de Optimização .....   | 13 |
| Figura 8: Exemplo de optimização topológica de uma viga em consola, em duas dimensões [10] .....                 | 14 |
| Figura 9: Exemplo de optimização estrutural bidimensional, utilizando <i>software</i> de optimização [10] .....  | 15 |
| Figura 10: Geometria do elemento LINK 1 .....  | 16 |
| Figura 11: Dados de saída para o elemento LINK 1 .....   | 16 |
| Figura 12: Geometria do elemento BEAM 3 .....  | 17 |
| Figura 13: Dados de saída para o elemento BEAM 3 .....   | 17 |
| Figura 14: Geometria do elemento PIPE 16 .....   | 18 |
| Figura 15: Dados de saída para o elemento PIPE 16 .....  | 18 |
| Figura 16: Geometria do elemento SHELL 63 .....  | 19 |
| Figura 17: Dados de saída do elemento SHELL 63 .....   | 19 |
| Figura 18: Geometria do elemento SHELL 93 .....  | 20 |
| Figura 19: Dados de saída do elemento SHELL 93 .....   | 20 |
| Figura 20: Perfil INP 400 .....  | 21 |
| Figura 21: Esquema do problema proposto .....  | 22 |
| Figura 22: Modelação do problema em ANSYS .....  | 23 |
| Figura 23: Modelação da viga com elementos casca .....   | 24 |
| Figura 24: Análise topológica com 60% de redução de volume .....   | 25 |
| Figura 25: Análise topológica com 65% de redução de volume .....   | 25 |
| Figura 26: Modelação inicial da estrutura tubular .....  | 26 |
| Figura 27: Esquema da situação da estrutura tubular .....  | 27 |
| Figura 28: Modelação do problema em ANSYS .....  | 27 |
| Figura 29: Tipos de perfis utilizados .....  | 29 |
| Figura 30: Modelação da estrutura em ANSYS .....   | 30 |
| Figura 31: Vista de pormenor dos perfis modelados .....  | 30 |
| Figura 32: Malha da estrutura .....  | 31 |
| Figura 33: Pormenor da conectividade entre elementos .....   | 32 |
| Figura 34: Carregamento aplicado .....   | 33 |
| Figura 35: Posições de carregamento 1 e 2 .....  | 34 |
| Figura 36: Posições de carregamento 3 e 4 .....  | 34 |
| Figura 37: Distribuição de tensões de <i>V. Mises</i> na estrutura actual para a posição de carregamento 2 ..... | 35 |
| Figura 38: Modos de vibração 1 e 2 na estrutura actual .....   | 36 |
| Figura 39: Modos de vibração 3 e 4 na estrutura actual .....   | 36 |
| Figura 40: Modo de vibração da antepara na estrutura actual completa .....                                       | 37 |
| Figura 41: Estrutura alternativa com recortes de forma circular .....  | 38 |



|  |    |
|--|----|
| Figura 42: Estrutura alternativa com recortes de forma triangular.....                               | 38 |
| Figura 43: Padrão longitudinal .....   | 39 |
| Figura 44: Padrão transversal .....  | 39 |
| Figura 45: Grelha de elementos tubulares da estrutura alternativa .....                              | 40 |
| Figura 46: Pormenor da grelha de elementos tubulares .....   | 40 |
| Figura 47: Modelação da estrutura alternativa .....  | 41 |
| Figura 48: Distribuição de tensões na antepara para a estrutura 4 e carregamento 4.....              | 42 |
| Figura 49: Distribuição de tensões nos elementos tubulares para a estrutura 4 e carregamento 4 ..... | 43 |
| Figura 50: Modos de vibração 1 e 2 das estruturas alternativas.....                                  | 43 |
| Figura 51: Modos de vibração 3 e 4 das estruturas alternativas .....                                 | 44 |

## Índice de tabelas

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1: Principais características da fragata da classe “Vasco da Gama” .....                            | 3  |
| Tabela 2: Especificações do helicóptero .....  | 4  |
| Tabela 3: Propriedades do material [4].....  | 8  |
| Tabela 4: Composição do material [4] .....   | 8  |
| Tabela 5: Factores parciais de segurança [7].....  | 9  |
| Tabela 6: Características do perfil INP 400.....   | 21 |
| Tabela 7: Parâmetros utilizados na modelação em ANSYS.....   | 23 |
| Tabela 8: Comparação de resultados .....   | 23 |
| Tabela 9: Comparação de frequências naturais .....   | 24 |
| Tabela 10: Características do perfil de secção circular [12] (Anexo D) .....                               | 26 |
| Tabela 11: Parâmetros utilizados na modelação em ANSYS.....  | 27 |
| Tabela 12: Comparação de forças entre elementos .....  | 28 |
| Tabela 13: Comparação de Tensões entre elementos .....   | 28 |
| Tabela 14: Distribuição de tensões de <i>V. Mises</i> na estrutura actual.....                             | 35 |
| Tabela 15: Frequências naturais da estrutura actual .....  | 35 |
| Tabela 16: Percentagem de redução de massa nas estruturas alternativas com recortes.....                   | 39 |
| Tabela 17: Dimensões dos elementos tubulares .....   | 41 |
| Tabela 18: Distribuição de tensões na estrutura alternativa 3 .....  | 42 |
| Tabela 19: Distribuição de tensões na estrutura alternativa 4 .....  | 42 |
| Tabela 20: Frequências naturais das estruturas alternativas propostas.....                                 | 43 |
| Tabela 21: Comparação de massa e deformada entre estruturas .....  | 44 |
| Tabela 22: Comparação de resultados entre todas as estruturas alternativas. Factor de<br>segurança=2 ..... | 45 |
| Tabela 23: Comparação de resultados com factor de segurança 1,5 .....                                      | 46 |

# **Capítulo 1 - Introdução**

## **1.1. Objectivos e enquadramento**

O presente trabalho visa analisar a possibilidade de substituir os perfis existentes que suportam o convés de voo de uma fragata da classe “Vasco da Gama” da Marinha Portuguesa por estruturas de elementos tubulares, com o intuito de reduzir a massa da estrutura e dessa forma melhorar o desempenho e os consumos, mantendo os níveis de tensão induzidos inferiores à tensão de cedência do material utilizado.

Os objectivos antes enunciados enquadram-se nas necessidades da Marinha Portuguesa de modernizar e melhorar a sua frota, mais precisamente as fragatas da classe “Vasco da Gama”[1].

A tese contou com orientação quer de um professor da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, quer com a orientação de engenheiros da Direcção de Navios da Base Naval de Lisboa (BNL).

Este projecto surgiu de uma proposta da Direcção de Navios da Base Naval de Lisboa (BNL) à Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT), como estágio curricular e tese final do curso de Engenharia Mecânica.

## **1.2. Instituições envolvidas**

A BNL é a principal instalação operacional da Marinha Portuguesa, baseando-se aí a maioria da sua esquadra. A BNL está instalada no Perímetro Militar do Alfeite, o qual abrange outras unidades da marinha, tais como a Escola Naval, a Escola de Tecnologias Navais, a Direcção de Navios, a Entidade Pública Empresarial Arsenal S.A. e a Base de Fuzileiros.

A Direcção de Navios é um Organismo de Direcção Técnica que gere tecnicamente toda a esquadra da Marinha (mais de cento e cinquenta unidades, sendo actualmente o maior armador nacional em número) desde a sua concepção ao seu abate.

Sendo do interesse da FCT/UNL formar Engenheiros com uma sólida formação e preparados para o mercado de trabalho, as duas entidades têm vindo a formar uma forte ligação, proporcionando melhor ensino, investigação e o desenvolvimento de projectos no âmbito da Engenharia Mecânica, entre outras.

### **1.3. Descrição da organização da tese**

A presente tese apresenta-se estruturada em quatro capítulos.

No primeiro capítulo é indicada a pertinência do estudo, os seus objectivos, é feita referência às instituições envolvidas e são descritos os elementos em estudo.

No segundo capítulo é descrito o método utilizado, sendo feita uma introdução ao Método dos Elementos Finitos (MEF). É também feita a validação do método através de comparação com exemplos analíticos.

No terceiro capítulo é feita a determinação de tensões na estrutura actual e nas estruturas alternativas propostas e são comparados os resultados obtidos.

No quarto capítulo são apresentadas as principais conclusões do estudo.

O trabalho termina com as referências bibliográficas e anexos.

### **1.4. Descrição da fragata, convés e helicóptero**

#### **1.4.1. Descrição da fragata**

As fragatas da classe “Vasco da Gama” (fig. 1), sendo consideradas as mais emblemáticas unidades ao serviço da Marinha Portuguesa, entraram ao serviço em 1991, sendo a primeira unidade naval portuguesa equipada com sistemas de lançamento de mísseis superfície-superfície e superfície-ar [1]. Entre várias inovações ligadas aos sistemas de integração de armas e sensores, de comunicações, de propulsão, etc., cada navio tem atribuído dois helicópteros para luta anti-submarina (AS) os quais, fazendo parte integrante do navio a que pertencem, permitem a optimização das suas capacidades na luta AS.



**Figura 1: Fragata da classe "Vasco da Gama"**

Na tabela 1 são evidenciadas as principais características da fragata:

**Tabela 1: Principais características da fragata da classe "Vasco da Gama"**

| <b>Características</b>  |
|---|
| Deslocamento 3200t  |
| Comprimento 115.9m  |
| Boca máxima 14,2m   |
| Calado 6.2m   |
| Velocidade Máxima:  |
| Motores Diesel 20 nós   |
| Turbinas a Gás 32 nós   |
| <b>Propulsão</b>  |
| 2 Motores Diesel MTU 8.840hp                                      |
| 2 Turbinas a Gás GE 2500LM 53.000hp                               |
| <b>Armamento/Equipamento</b>                                      |
| Peça de artilharia de 100 mm                                      |
| Peça de artilharia de 20 mm                                       |
| 2x4 mísseis NATO SEA SPARROW (curto alcance de defesa anti-aérea) |
| 2x4 mísseis HARPOON (longo alcance)                               |
| 2x3 reparos de tubos lança torpedos MK46                          |

|   |
|---|
| Radar de médio alcance - DA08                       |
| Radar de curto alcance - MW08                       |
| Radar de controlo de tiro – STIR                    |
| Sistema de guerra electrónica – APECS II            |
| Helicóptero Lynx Mk95                               |
| Sistema de defesa anti-míssil (CIWS VULCAN-PHALANX) |
| Antena InmarsatB - Comunicações Satélite            |
| Radar de vigilância longo alcance - DA08            |
| Sistema de contramedidas anti-míssil – SRBOC        |
| Sonar de médio alcance - AN/SQS 510                 |

### 1.4.2. Descrição do helicóptero

A componente aérea da Marinha é formada pela Esquadrilha de Helicópteros “Super Lynx 300” (fig. 2) que realizam missões de luta anti-submarina, luta anti-superfície e interdição de área [2]. Desenvolvem ainda missões de carácter secundário como transporte de carga e pessoal, reconhecimento e missões de busca e salvamento.



Figura 2: Helicóptero “Super Lynx 300”

Na tabela 2 e nas figuras 3 e 4 são também evidenciadas as principais especificações e dimensões do helicóptero em duas configurações: normal e dobrada.

Tabela 2: Especificações do helicóptero

| <b>Características</b>                    |
|---|
| Peso máximo à descolagem: 5330 kg         |
| Tecto de serviço: 2000 pés                |
| Combustível: 787 kg                       |
| Velocidade Máxima: 132 nós                |
| <b>Propulsão</b>                          |
| 2 Motores LHTEC CTS800-4N 1267hp / 1620hp |

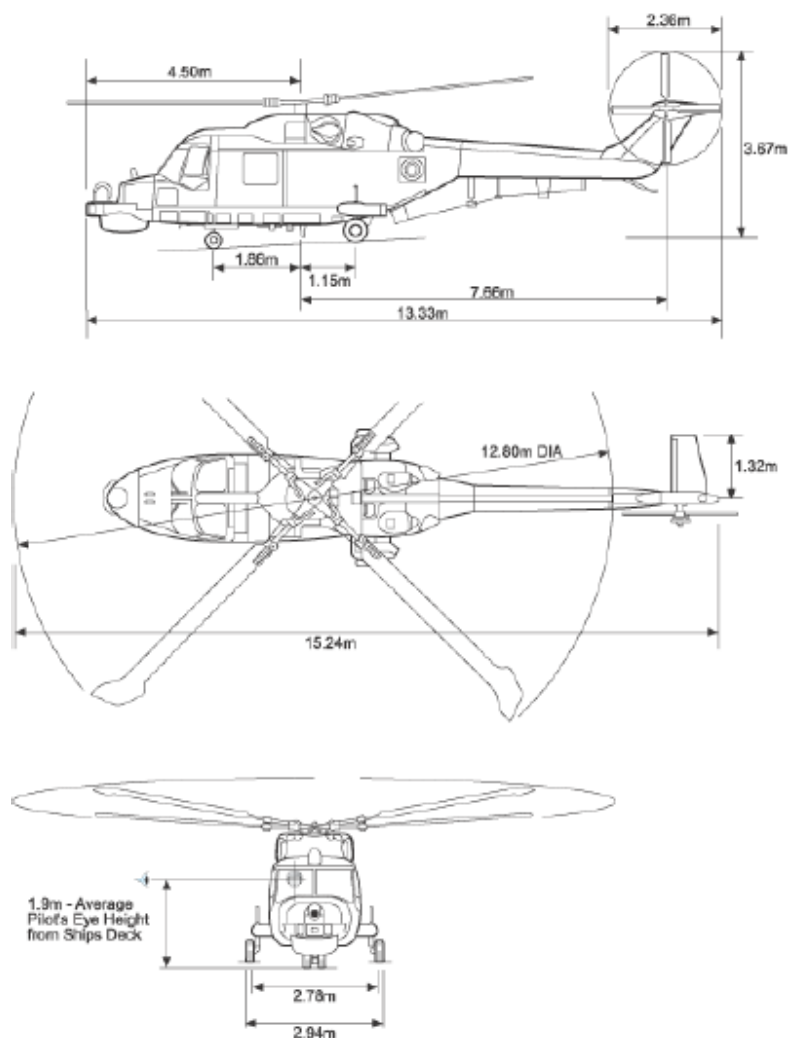


Figura 3: Dimensões do helicóptero na configuração normal



Figura 4: Dimensões do helicóptero na configuração dobrada

### 1.4.3. Descrição do convés

O convés de voo (figs. 5 e 6) é a zona da fragata onde operam os helicópteros. Situa-se na popa do navio e tem uma área de cerca de 16x19 metros. De acordo com os desenhos de pormenor do navio (anexo A), o convés sobrepõe-se a dois compartimentos (M e L), separados por uma antepara no 2º convés e existem quatro colunas no compartimento M no 2º convés. Todos estes elementos estruturais contribuem para a resistência e integridade do convés de voo e estiveram presentes no estudo. As 4 colunas têm uma massa de cerca de 171 kg e o convés e a antepara uma massa de 24 021 kg. Os perfis têm uma massa conjunta de cerca de 12 700 kg. A massa total da estrutura é 36 892 kg.

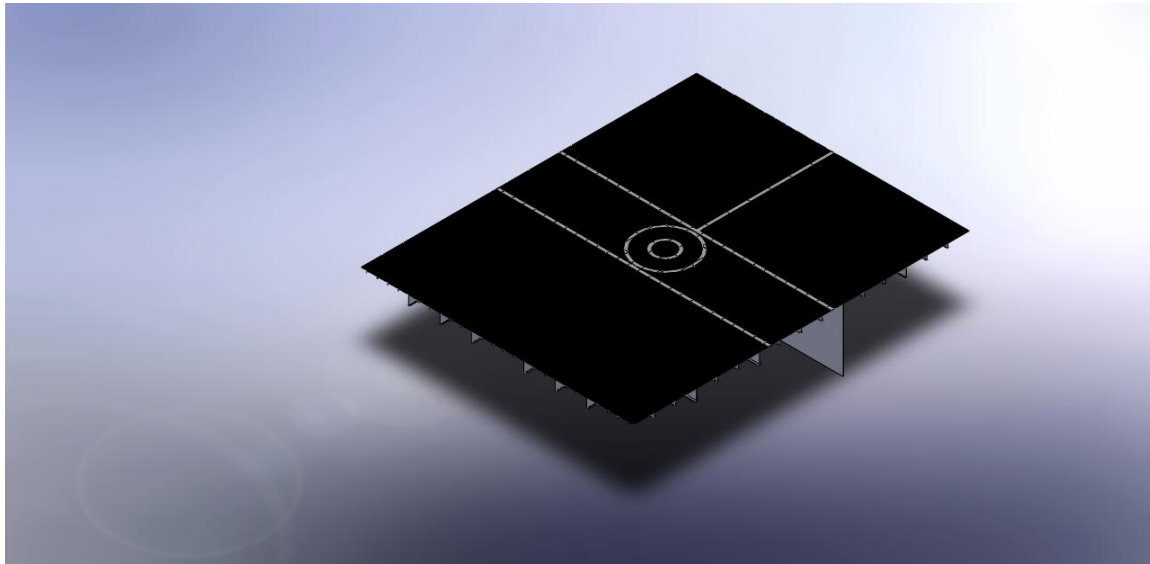


Figura 5: Modelação tridimensional do convés

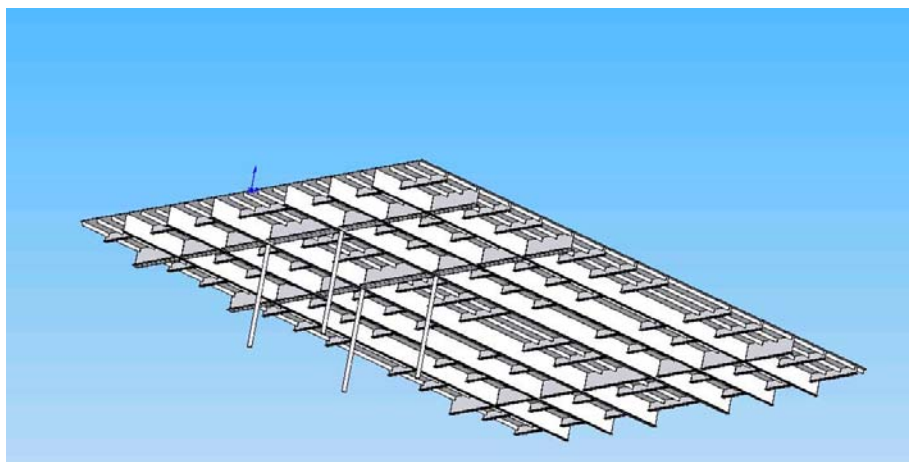


Figura 6: Modelação tridimensional do convés (sem antepara)



#### 1.4.4. Descrição dos elementos tubulares

Uma estrutura de elementos tubulares, vulgarmente conhecida como “treliça”, é uma estrutura formada por “barras” articuladas nas suas junções, estas denominadas por “nós” [3].

A “treliça” é um tipo de solução estrutural prático e económico para muitos problemas de engenharia, pois são capazes de suportar cargas elevadas sem sofrerem grandes deformações. As “barras” que constituem as treliças são compridas e delgadas, podendo ser maciças ou ocas para minimizar a massa. Do ponto de vista mecânico são submetidas a esforços axiais de tracção e compressão simples, sendo estes esforços por sua vez transferidos pelos “nós” para as “barras” adjacentes. Uma outra característica da “treliça”, que lhe confere a possibilidade de se tornar num sistema estático, é o facto de as “barras” poderem formar triângulos. O triângulo é a figura plana mais simples, de morfologia “indeformável” mediante a aplicação de forças externas ou internas no limite da resistência dos materiais que constituem esses elementos. Os sistemas reticulados formados por barras rígidas, como as “treliças”, são estáticos na medida em que têm uma configuração triangular enquanto que os sistemas que tenham a configuração de qualquer outro poliedro virão a ter uma característica mais associada aos mecanismos (que têm tendência a moverem-se) do que às estruturas rígidas.

As “treliças” simples podem ser aumentadas obtendo-se uma “treliça” maior adicionando duas barras ligadas a duas articulações existentes e ligadas entre si por uma nova articulação. Sempre que são adicionadas duas barras, o número de nós aumenta em um, fazendo com que o número de total de barras respeite a condição  $m=2n-3$ , onde  $n$  é o número total de “nós”.

Paralelamente, as estruturas “treliçadas” têm a facilidade de, por serem constituídas de peças relativamente pequenas quando comparadas ao sistema como um todo, serem facilmente fabricadas em ambiente controlado e transportadas para o local de montagem onde seriam montadas com todo o rigor técnico necessário. Isto resulta em qualidade com baixo custo e pode significar a diferença num projecto de grandes dimensões.

## 1.5. Descrição do Material

O material utilizado na construção da estrutura em análise é o aço de construção naval D 36 [4], que é um aço de média resistência, cujas propriedades e composição química estão representadas nas tabelas 3 e 4.

**Tabela 3: Propriedades do material [4]**

| Densidade | Tensão de cedência (MPa) | Tensão de rotura (MPa) | Extensão após rotura (%) | Módulo de distorção (GPa) | Módulo de Young (GPa) |
|-----------|--------------------------|------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------|
| 7,85      | 355                      | 490-620                | 22                       | 80                        | 210                   |

**Tabela 4: Composição do material [4]**

| Elemento | Carbono, C | Ferro, Fe | Manganês, Mn | Fósforo, P | Silício, Si | Enxofre, S |
|----------|------------|-----------|--------------|------------|-------------|------------|
| %        | 0,18       | 98,0      | 1,25         | 0,040      | 0,30        | 0,050      |

Este aço tem a característica de ser amagnético, isto é, de não produzir campos magnéticos, sendo, por isso, mais eficaz em guerra de minas

## 1.6. Factores de segurança

O factor de segurança representa a capacidade de uma estrutura resistir para além da sua carga normal de trabalho. Os parâmetros que influenciam a escolha do factor de segurança a utilizar são, entre outros, o tipo de carregamento, o material utilizado, o desgaste e as condições de serviço [5].

Para o projecto do convés de voo, o factor de segurança atribuído ao carregamento vai ter em conta os efeitos dinâmicos do navio e dos ventos, não sendo necessário aplicar um factor de segurança ao material. Segundo Chalmers [6], para a condição de aterragem, o factor de segurança a aplicar ao carregamento é de 1,5 para os reforços e 1,2 para as chapas. Segundo a sociedade classificativa para a indústria naval *Germanischer Lloyd* [7], as regras para construção têm como referência factores de segurança parciais de acordo com os tipos de carregamento apresentados na tabela 5.

**Tabela 5: Factores parciais de segurança [7]**

| Tipo de carregamento   | LCA  | LCB  | LCC  | LCD |
|--|------|------|------|-----|
| Factor para a resistência estrutural $\gamma_m$              | 1,1  | 1,1  | 1,0  | 1,1 |
| Factor para componentes de cargas estáticas $\gamma_{fstat}$ | 1,5  | 1,05 | 1,0  | 1,0 |
| Factor para componentes de cargas dinâmicas $\gamma_{fdyn}$  | 2,0  | 1,4  | 1,0  | 1,0 |
| Factor para cargas combinadas $\psi_i$                       |      |      |      |     |
| $\psi_{imin}$  | 0,75 | 0,7  | 0,75 | 0,7 |
| $\psi_{imax}$  | 1,0  | 1,0  | 1,0  | 1,0 |

sendo que:

LCA: Cargas permanentes cíclicas que actuam na estrutura não danificada em condições normais de serviço.

LCB: Cargas estáticas cíclicas que actuam na estrutura não danificada em condições extremas de serviço.

LCC: Cargas permanentes cíclicas em condições normais de serviço; referentes a análises de fadiga.

LCD: Cargas estáticas cíclicas que actuam na estrutura danificada.

$\psi_i$ : Factor para cargas dinâmicas combinadas, simultâneas, calculadas estatisticamente.

## Capítulo 2 – Métodos de cálculo utilizados

Devido às dimensões, carregamento e complexidade da estrutura analisada (convés de voo, reforços, anteparas e colunas) os métodos de estudo analíticos não são viáveis de ser utilizados no estudo integral das estruturas enunciadas. Foi necessário utilizar o MEF, recorrendo para isso ao programa ANSYS®.

### 2.1. Introdução ao MEF

O MEF é um procedimento numérico que pode ser usado para obter soluções para os mais variados problemas de engenharia [8], quer sejam de natureza estática, dinâmica linear ou não linear, podendo envolver transferência de calor, dinâmica de fluidos, electromagnetismo, etc.

O MEF teve a sua origem em 1943 por *Courant*, que usou interpolação polinomial sobre sub regiões triangulares para investigar problemas de torção [9]. Mas foi em 1960 que o investigador *Ray Clough* tornou o termo “elemento finito” popular. Foi nessa altura com a banalização do recurso ao computador que passou a ser prática corrente a análise de estruturas de geometria arbitrária, constituídas por múltiplos materiais e sujeitas a qualquer tipo de carregamento. O método começou também a ser utilizado em outras áreas de engenharia, como a transferência de calor e dinâmica dos fluidos. Este avanço é tão significativo que os outros métodos deixaram praticamente de ser utilizados, restringindo-se apenas a fornecer soluções teóricas de problemas simples para validar os métodos aproximados.

#### Principais passos do Método dos Elementos Finitos

- 1- Criar e discretizar o domínio da solução em elementos finitos, ou seja, dividir o problema em nós e elementos.
- 2- Assumir as funções de forma que representam o comportamento físico do elemento, ou seja, é assumida uma função contínua aproximada que representa a solução do elemento.
- 3- Desenvolver as equações para o elemento.

- 4- Assemblar/conjugar os elementos para resolver o problema inteiro, construindo a matriz de rigidez global [K].
- 5- Aplicar condições de fronteira e carregamentos, isto é vectores de forças {F} e de deslocamentos {u}.
- 6- Resolver simultaneamente um conjunto de equações algébricas lineares e não lineares, para obter resultados nos nós.  $[K] \{u\} = \{F\}$ .

## 2.2. Formulação do MEF

Começa-se por dividir o problema em nós e elementos e assume-se uma solução que aproxima o comportamento do elemento. De maneira a estudar o comportamento de uma barra presente numa estrutura treliçada típica vai-se considerar a deformação de um sólido com secção uniforme de área A, com comprimento l, e sujeito a uma força F.

A tensão média no sólido é dada por:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

A extensão média no sólido é definida pelo quociente entre a deformação e o comprimento inicial:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (2)$$

Na região elástica, a tensão e a extensão estão relacionados pela lei de Hooke:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3)$$

Onde E é o módulo de elasticidade do material.

Combinando as equações, vem:

$$F = \left( \frac{AE}{l} \right) \Delta l \quad (4)$$

É de notar que a equação resultante é semelhante à equação de uma mola  $F = kx$ .

Então, um sólido de secção uniforme pode ser modelado como uma mola com uma rigidez equivalente:

$$k_{eq} = \frac{AE}{l} \quad (5)$$

Discretizando o sólido em elementos e com o comportamento de cada elemento modelado pela equação da mola, vem:

$$F = k_{eq}(u_{i+1} - u_i) = \frac{A_{avg} E}{l}(u_{i+1} - u_i) = \frac{(A_{i+1} + A_i)E}{2l}(u_{i+1} - u_i) \quad (6)$$

Com a constante de rigidez equivalente:

$$k_{eq} = \frac{(A_{i+1} + A_i)E}{2l} \quad (7)$$

Onde  $A_i$  e  $A_{i+1}$  são as áreas de secção nos nós  $i$  e  $i+1$  e onde  $u_i$  e  $u_{i+1}$  representam os respectivos deslocamentos nodais.

Fazendo o diagrama de corpo livre dos nós e escrevendo as equações de equilíbrio em forma de matriz, vem:

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & \dots & k_{1n} \\ & k_{22} & k_{23} & \dots & k_{2n} \\ & & \ddots & \ddots & \vdots \\ S & & & k_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{Bmatrix} \quad (8)$$

As condições de fronteira do problema definem quais os termos que são zero e quais os conhecidos, de forma a se poder resolver o sistema de equações. Com a resolução do sistema (8) obtêm-se todos os deslocamentos nos nós e todas as forças aplicadas.

## 2.3. Introdução à optimização topológica

Um engenheiro tem como função utilizar os seus conhecimentos teóricos e práticos na procura de uma solução para um qualquer problema que se lhe apresente [10]. Determinar qual o tipo de solução é um passo importante, mas o seu trabalho só fica realmente finalizado quando vai além do projecto conceptual e apresenta o projecto de detalhe. Nesse projecto de detalhe, o engenheiro, através de cálculos, determina qual a forma, dimensões, material, processo de fabrico, e outros, que o objecto do projecto necessita para corresponder da melhor forma às suas funções.

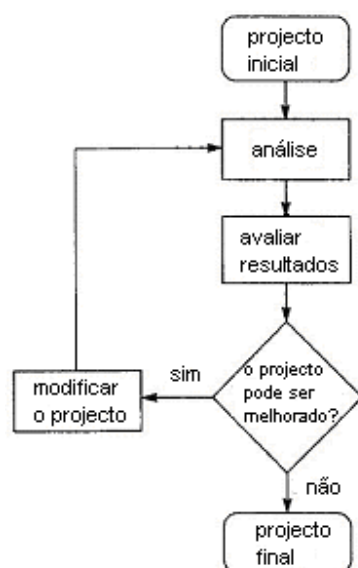
Para tal têm de se considerar as restrições físicas e económicas, que pense necessárias. Dessa forma, atingir uma solução onde o material utilizado seja o menor possível é algo que se espera. O engenheiro tem de otimizar a forma do objecto de

projecto para que este resista às solicitações, dentro de um determinado factor de segurança.

Os processos de optimização analítica têm sido utilizados desde há longos anos, mas a chegada dos computadores trouxe um poder de cálculo que os engenheiros souberam desde logo utilizar. Neste momento, a Engenharia Auxiliada por Computador (EAC) é uma das ferramentas mais importantes ao serviço da Engenharia.

Uma das áreas onde o computador é fundamental é na Análise por Elementos Finitos. Analiticamente esta análise pode ser efectuada de forma rápida, desde que o número de elementos seja muito reduzido. Mas na maior parte dos casos isso não acontece. O computador possibilitou o cálculo quase instantâneo deste tipo de problemas. Um passo óbvio foi a utilização do computador nas análises de optimização em elementos finitos.

A optimização é efectuada através da utilização de algoritmos que, de forma iterativa (fig. 7), levam à obtenção de um objectivo que se aproxima do objectivo proposto, isto é, à solução óptima ao problema imposto. Esses algoritmos são resolvidos utilizando vários tipos de abordagem.



**Figura 7: Um Procedimento de Optimização**

Existem vários tipos de optimização, sendo os mais frequentes a análise de forma e de topologia. A análise de forma é uma optimização da geometria do objecto, enquanto a análise topológica é uma análise de distribuição de material no objecto. O primeiro tipo de optimização é referido como optimização de forma e encontra-se largamente relacionado

com o controle definido pelo utilizador das funções e parâmetros que devem ser restringidos ou minimizados usando métodos de optimização usuais. O objectivo da optimização topológica é encontrar a melhor distribuição de material ao longo da peça, sendo o critério de objectivo valores máximos e mínimos de material para os constrangimentos dados, isto é redução de volume de material utilizado.

A optimização topológica é efectuada quando um projectista não tem uma ideia clara sobre qual a distribuição de material que deve ter um determinado objecto de projecto. Trata-se pois da definição de um esboço inicial da posição dos elementos estruturais, obtido através de uma distribuição de material, num modelo de estrutura inicialmente em bruto, de forma a resistir aos esforços de serviço.

O programa de elementos finitos, com base em condições de fronteira e carregamento aplicado ao modelo inicial da estrutura, depois de resolver uma análise estrutural, realiza uma análise topológica onde determina a distribuição da densidade do material, nos elementos finitos que discretizam a estrutura. Se a densidade tiver um valor próximo da unidade, então esse elemento é de importância para a estrutura. Se for nulo ou perto disso, então esse elemento não sofre esforço significativo e não é de importância para a estrutura. Assim, em termos visuais, fica uma imagem de elementos importantes para a estrutura, e os outros, menos importantes, que representam uma zona de vazio (fig. 8 e 9).

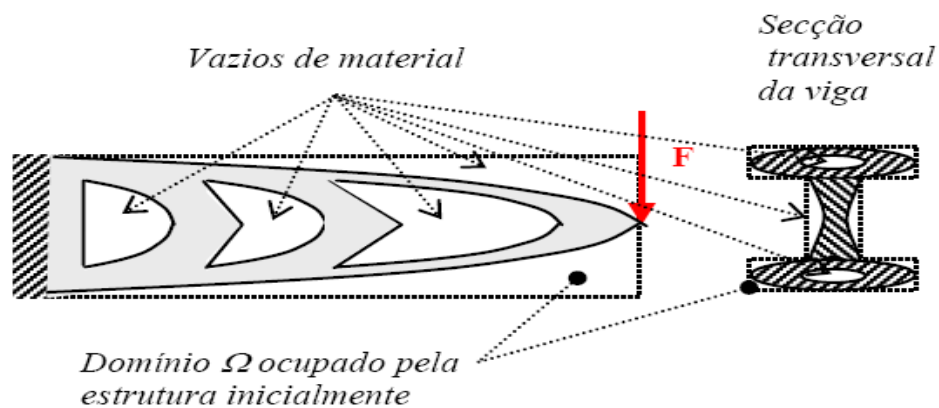


Figura 8: Exemplo de optimização topológica de uma viga em consola, em duas dimensões [10]



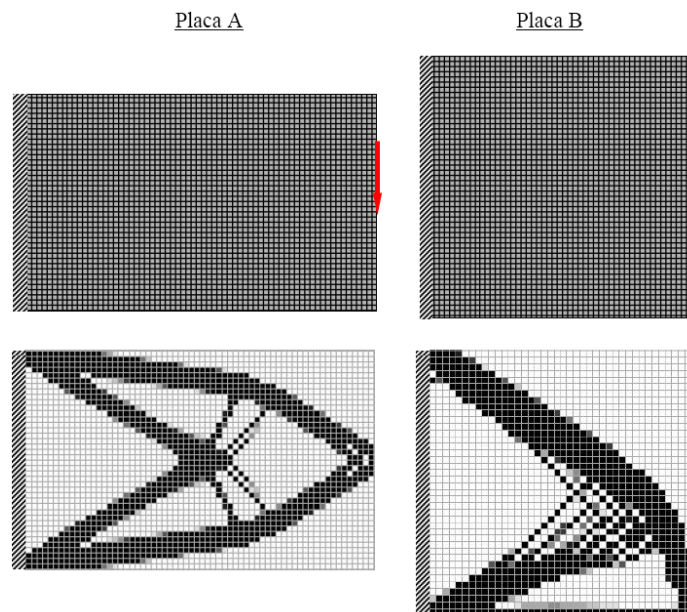


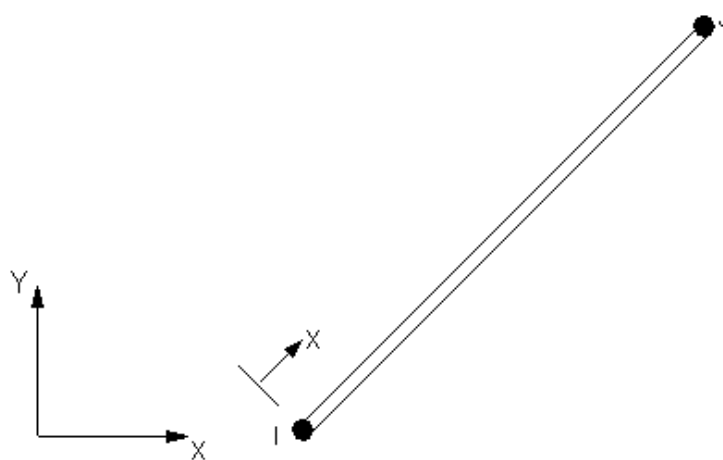
Figura 9: Exemplo de optimização estrutural bidimensional, utilizando *software* de optimização [10]

## 2.4. Descrição dos elementos finitos utilizados durante a aplicação do MEF

Os elementos finitos descritos neste capítulo foram utilizados nas várias aplicações do MEF. O elemento barra (LINK 1) e o elemento viga (BEAM 3) foram utilizados na validação do MEF. O elemento tubular (PIPE 16) foi utilizado também na validação do MEF, mas principalmente na modelação de todos os tubos e colunas de todas as estruturas analisadas. O elemento casca (SHELL 63) foi utilizado para modelar o convés de voo, a antepara e todos os reforços da estrutura actual. O elemento casca (SHELL 93) foi utilizado na análise topológica.

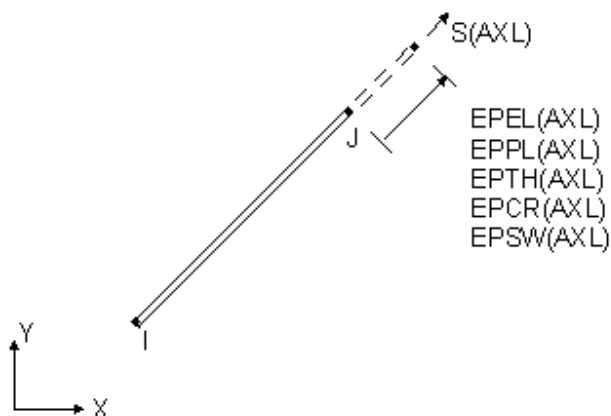
### 2.4.1. Elemento barra (LINK 1)

O elemento LINK 1 (fig.10) é um elemento uniaxial com capacidade de resistir a solicitações de tracção e compressão. O elemento tem dois graus de liberdade em cada um dos dois nós que o compõem (I, J, fig.10) e translação nas direcções x e y.



**Figura 10: Geometria do elemento LINK 1**

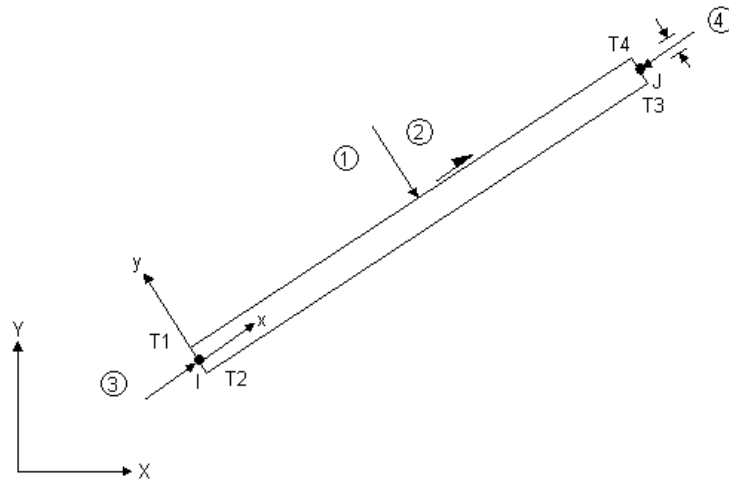
Os dados de entrada deste elemento são a área de secção transversal resistente, a extensão/pré-esforço inicial e as propriedades do material. Os dados de saída são forças, tensões, máxima e mínima, extensões e temperaturas (fig.11).



**Figura 11: Dados de saída para o elemento LINK 1**

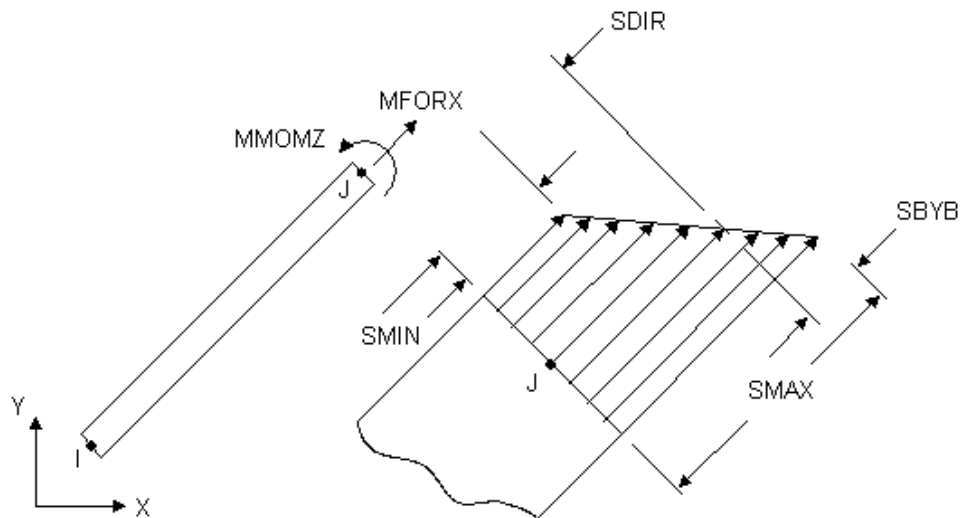
### 2.4.2. Elemento viga (BEAM 3)

O elemento BEAM 3 (fig.12) é um elemento uniaxial com capacidades de resistir a solicitações de tracção, compressão e flexão. O elemento tem três graus de liberdade em cada um dos dois nós que o compõem (fig.12), sendo a translação nas direcções x e y e rotação em torno do eixo z.



**Figura 12: Geometria do elemento BEAM 3**

Os dados de entrada deste elemento são a área e o momento de inércia à flexão da secção transversal resistente, a altura da viga e as propriedades do material. Os dados de saída são as tensões, máxima e mínima, extensão, esforço transversal e momento flector (fig.13).

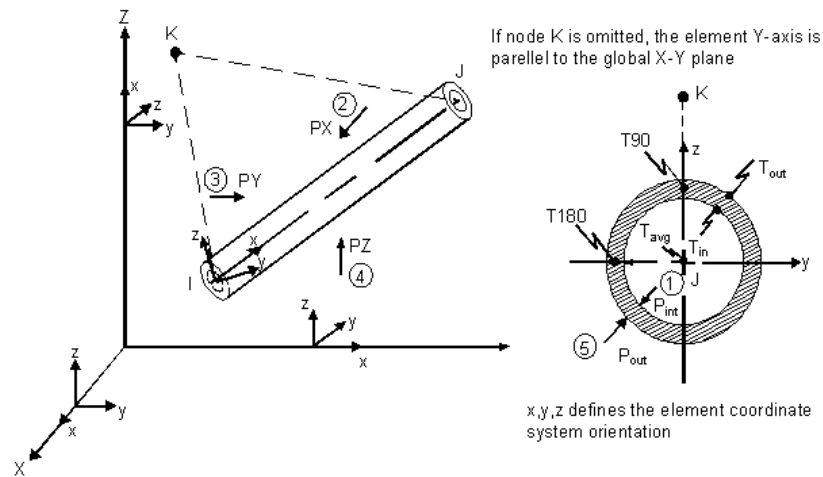


**Figura 13: Dados de saída para o elemento BEAM 3**

### 2.4.3. Elemento tubular (PIPE 16)

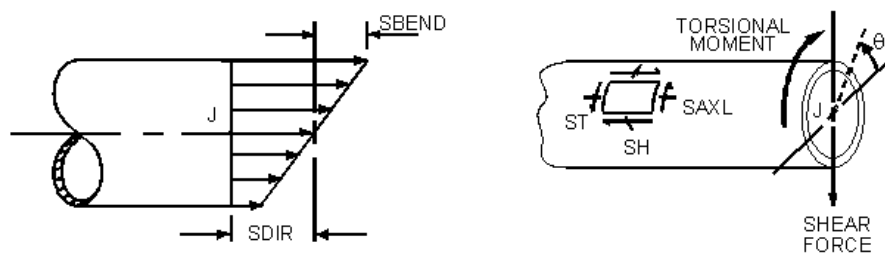
O elemento PIPE16 (fig.14) é um elemento uniaxial com capacidade para resistir a solicitações de tracção, compressão, torção e flexão. O elemento tem seis graus de

liberdade em cada um dos dois nós que o compõem, com translações nas direcções nodais  $x$ ,  $y$ , e  $z$ , e rotação nos eixos  $x$ ,  $y$ , e  $z$ . Este elemento é baseado no elemento viga 3D (BEAM4) e inclui simplificações através da simetria e uma geometria de tubagem padrão.



**Figura 14: Geometria do elemento PIPE 16**

Os dados de entrada deste elemento, são o diâmetro exterior, a espessura da parede tubular, o factor de intensidade de tensões, factores de flexibilidade e propriedades isotrópicas do material, entre outras constantes direccionadas para a área de fluidos. Os dados de saída são compostos pelos esforços nodais da solução total nodal. As tensões principais e a intensidade de tensão não incluem a componente da tensão correspondente à força de corte e é baseada na tensão de dois pontos extremos em pontos opostos do eixo neutro.

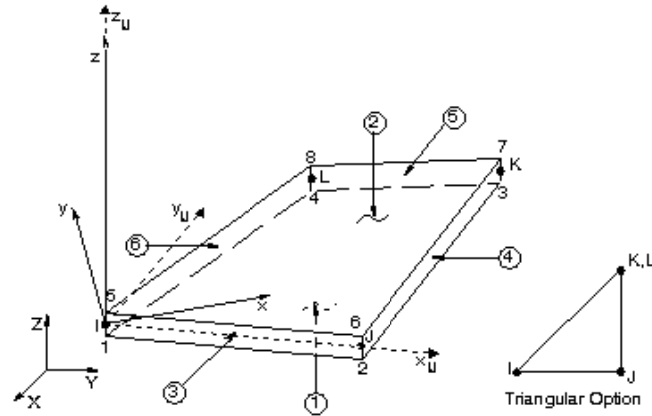


**Figura 15: Dados de saída para o elemento PIPE 16**

#### 2.4.4. Elemento casca (SHELL63)

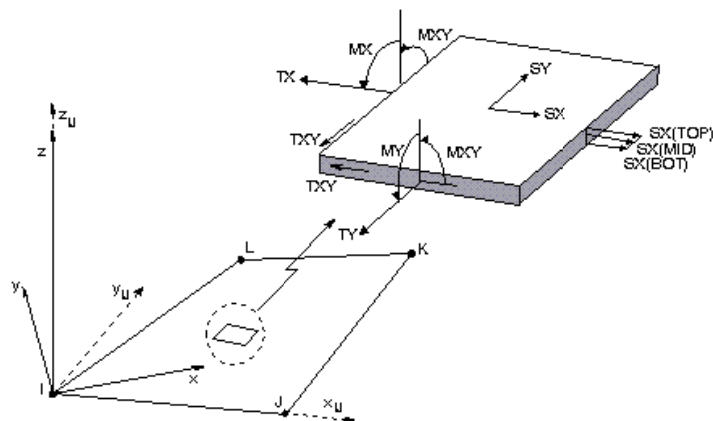
O elemento SHELL 63 tem seis graus de liberdade em cada um dos 4 nós que o compõem, com translações nas direcções nodais  $x$ ,  $y$ , e  $z$ , e rotações em torno dos eixos

nodais  $x$ ,  $y$  e  $z$ . O elemento permite simular endurecimento, grandes deflexões e grandes deformações.



**Figura 16: Geometria do elemento SHELL 63**

Este elemento é definido por quatro nós, até quatro espessuras e propriedades ortotrópicas. Os dados de saída após os cálculos são os deslocamentos nodais incluídos na solução nodal geral e os respectivos carregamentos e tensões associadas ao sistema de coordenadas do sistema.



**Figura 17: Dados de saída do elemento SHELL 63**

#### 2.4.5. Elemento casca SHELL 93

O elemento SHELL 93 tem seis graus de liberdade em cada nó, com translações nas direcções nodais de  $x$ ,  $y$ , e  $z$ , e rotações nos eixos nodais  $x$ ,  $y$  e  $z$ . As funções de forma de

deformação do elemento finito são quadráticas em ambas as direcções planas. O elemento admite plasticidade, endurecimento, grandes deflexões e grandes capacidades de extensão.

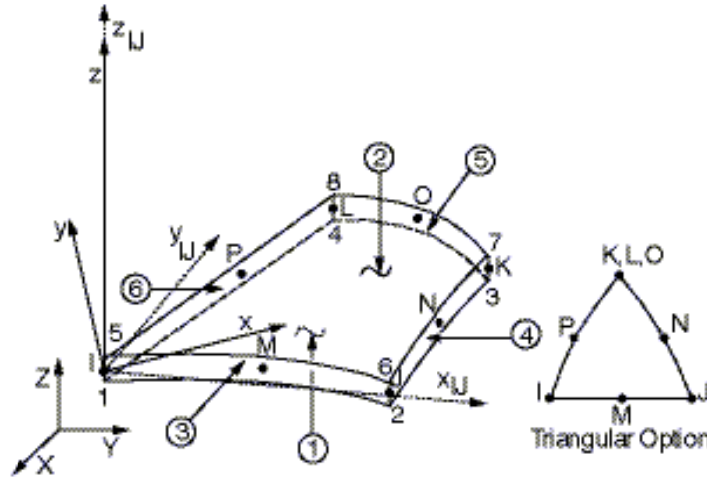


Figura 18: Geometria do elemento SHELL 93

Este elemento é definido por oito nós, até quatro espessuras e propriedades ortotrópicas. Os nós intermédios não podem ser removidos e elementos triangulares colapsados podem ser criados pela definição dos mesmos números de nós, para os nós correspondentes K, L e O (fig.19). Os dados de saída após os cálculos são os deslocamentos nodais incluídos na solução nodal geral, e os respectivos carregamentos e tensões associadas ao sistema de coordenadas do sistema.

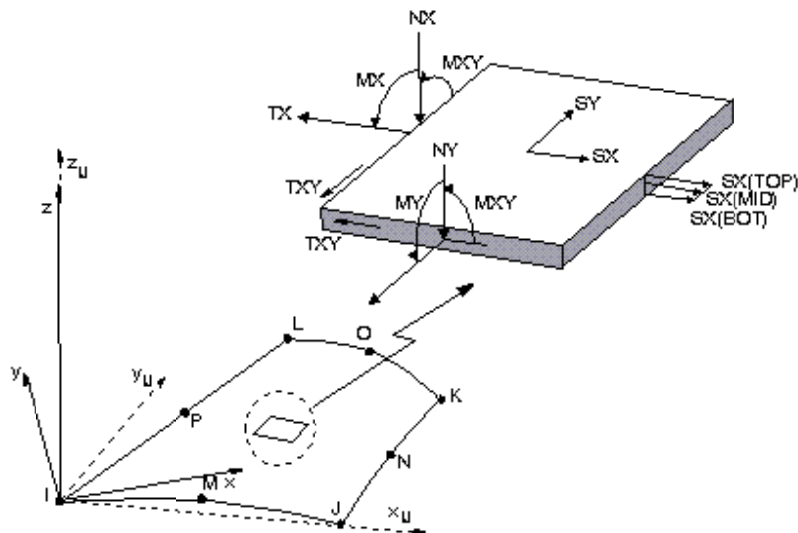


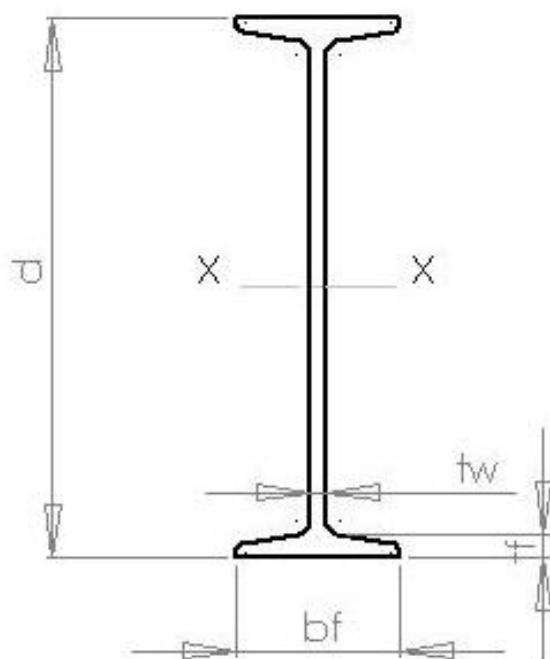
Figura 19: Dados de saída do elemento SHELL 93

## 2.5. Validação da utilização do MEF

### 2.5.1. Análise de uma viga simples

O MEF foi validado analisando uma viga com secção transversal resistente na forma de I (perfil INP, fig.20 e Tabela 6) e sujeita a carregamento a meio vão (fig.21), comparando-se a solução obtida por via computacional com a obtida através do método da sobreposição (solução analítica).

Tendo em consideração os vários reforços presentes na estrutura em análise (convés de voo), optou-se por estudar uma viga com perfil INP 400 para a validação do MEF. Na figura 20 e na tabela 6 estão representadas as características da secção do perfil INP 400.

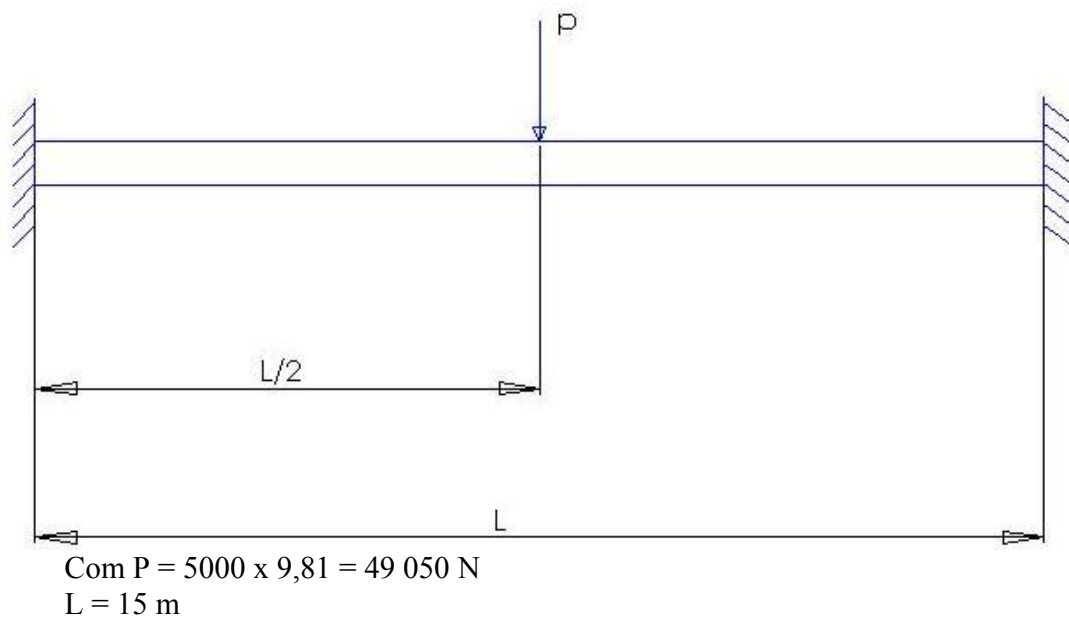


**Figura 20: Perfil INP 400**

**Tabela 6: Características do perfil INP 400**

|            |                    |        | Banzo   |           | Alma      | Eixo x-x                        |                                 |       |
|------------|--------------------|--------|---------|-----------|-----------|---------------------------------|---------------------------------|-------|
| Designação | Área               | Altura | Largura | Espessura | Espessura | $I_x$                           | $W_x$                           | $i_x$ |
|            | A, mm <sup>2</sup> | d, mm  | bf, mm  | tf, mm    | tw, mm    | 10 <sup>6</sup> mm <sup>4</sup> | 10 <sup>3</sup> mm <sup>3</sup> | mm    |
| INP 400    | 11 800             | 400    | 155     | 21,6      | 14,4      | 292                             | 1 460                           | 157   |

Foi analisada uma situação em que o peso aproximado do helicóptero seria aplicado a meio vão da viga (fig.20), estando esta encastrada nas suas extremidades tal como exemplificado na figura 21. A viga analisada, correspondendo a uma viga hiperestática, não é possível de resolver através das três conhecidas equações de equilíbrio ( $\sum F_x = 0$ ,  $\sum F_y = 0$ ,  $\sum M = 0$ ) [11]. Nestas situações, as reacções podem ser obtidas considerando as deformações da estrutura, calculando tanto a flecha como a rotação da mesma, podendo para isso utilizar, por exemplo, métodos energéticos. Outro método possível de ser utilizado é o método da sobreposição, que consiste em calcular separadamente a rotação e a flecha provocadas por cada uma das cargas, tratando as reacções redundantes como carregamentos desconhecidos que produzem deformações compatíveis com os apoios iniciais. A rotação ou a flecha no ponto onde o apoio foi modificado ou eliminado é então obtida calculando separadamente as deformações provocadas pelas cargas dadas e pelas reacções redundantes, e sobrepondo os resultados obtidos.



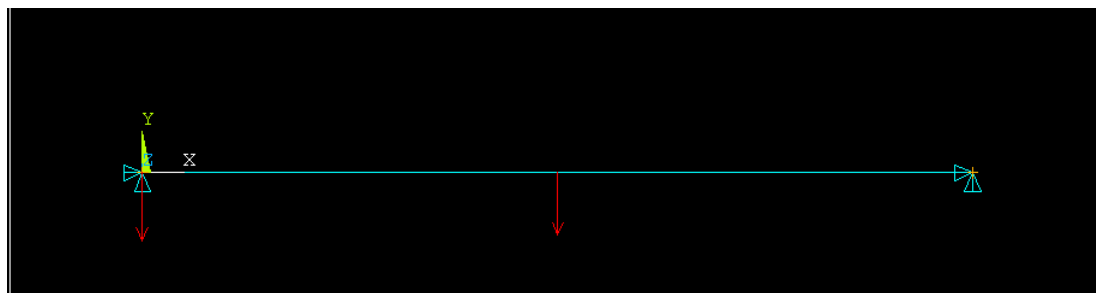
**Figura 21: Esquema do problema proposto**

Na resolução do problema (fig.21) em ANSYS®, utilizou-se o elemento BEAM 3 e foi modelado o problema com os parâmetros mostrados na tabela 7 e com o esquema da figura 22.



**Tabela 7: Parâmetros utilizados na modelação em ANSYS®**

|                          |   |
|--------------------------|---|
| Constantes               | $\text{Área}=11\,800 \times 10^{-6} \text{ m}^2$<br>$I_{z-z}=292 \times 10^{-6} \text{ m}^4$<br>$d=0.4 \text{ m}$<br>$\rho=7\,850 \text{ kg/m}^3$ |
| Propriedades do material | $E=200 \times 10^9 \text{ Pa}$<br>$\nu=0.3$   |
| Nº de nós                | 3:<br>1 (0,0,0) (m)<br>2 (7.5,0,0) (m)<br>3 (15,0,0) (m)  |
| Nº de elementos          | 2   |
| Carregamentos            | Encastramento nas extremidades<br>49 050 N a meio vão<br>Peso próprio   |



**Figura 22: Modelação do problema em ANSYS®**

Estando o procedimento e os cálculos descritos no anexo B, nas tabelas 8 e 9 apresenta-se a comparação entre os resultados obtidos analítica e numericamente.

**Tabela 8: Comparação de resultados**

|           | Ry (N)<br>Nos<br>encastramentos | M (Nm)<br>Nos<br>encastramentos | y (mm)<br>a meio<br>vão | $\sigma$ max (MPa)<br>nos<br>encastramentos |
|-----------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------|---|
| Analítico | 24 525                          | 91 968,75                       | - 14,76                 | 63  |
| Numérico  | 24 525                          | 91 969                          | - 14,76                 | 63  |

**Tabela 9: Comparação de frequências naturais**

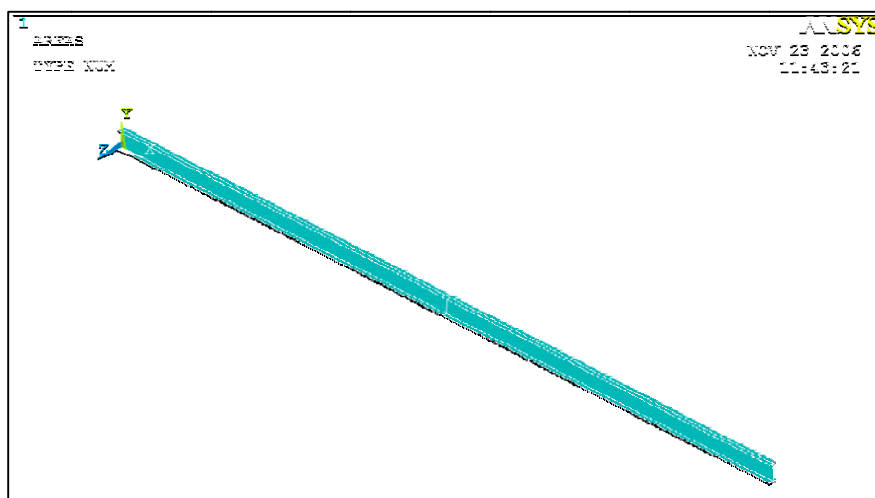
| Modos de vibração | Frequências de vibração (Hz)<br>Solução analítica | Frequências naturais (Hz)<br>Solução numérica |
|-------------------|---|---|
| 1                 | 12,6  | 12,75   |
| 2                 | -   | 45,87   |
| 3                 | -   | 185,41  |

As tabelas 8 e 9 mostram que os valores obtidos por ambos os métodos são iguais e que apenas nas frequências naturais existe uma diferença de 1%.

### 2.5.2. Análise topológica

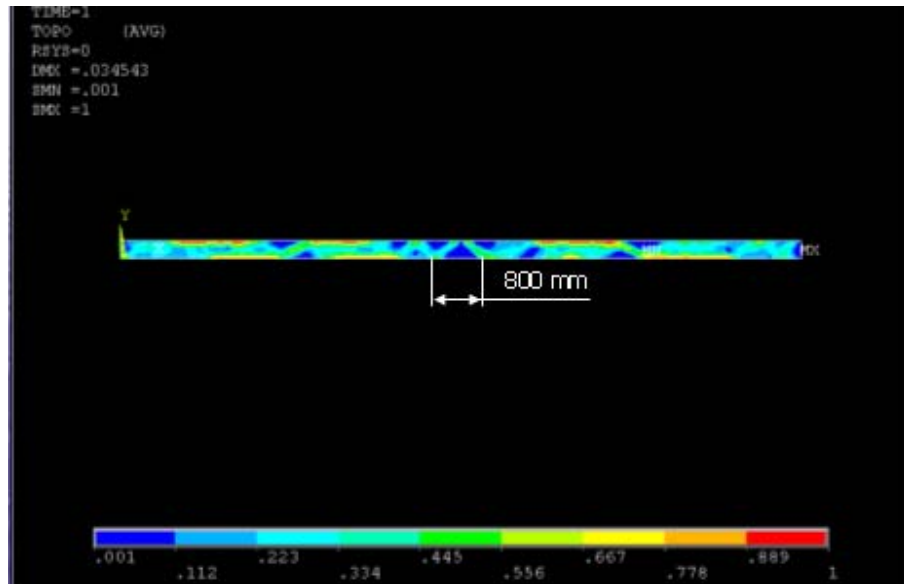
Antes de efectuar a modelação da estrutura actual e das estruturas alternativas do convés de voo em ANSYS®, fez-se uma análise topológica ao perfil de viga assumido na análise de validação do MEF (fig.21), procurando-se determinar a quantidade de volume de material que poderia ser retirada da viga sem comprometer as condições impostas. Esta análise permitiu consolidar a ideia base para a modelação das estruturas alternativas à estrutura reforçada do convés de voo.

A análise foi realizada no programa ANSYS®, recorrendo ao elemento SHELL 93, com espessura constante de 18 mm (fig. 23).

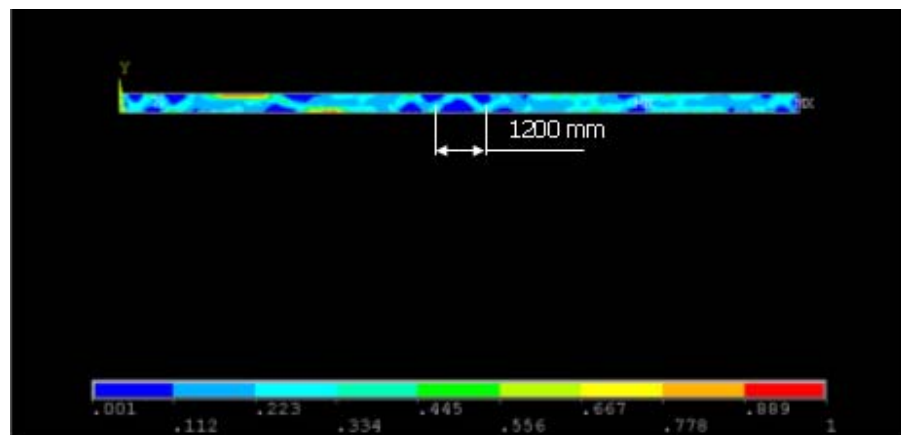


**Figura 23: Modelação da viga com elementos casca**

Foram feitas várias análises de otimização da rigidez, com o objectivo de reduções de volume de 50%, 60%, 65%, 67%, 70%, 71% e 75%. Os melhores e mais ilustrativos resultados foram com as análises de 60% e 65% (fig. 24 e 25).

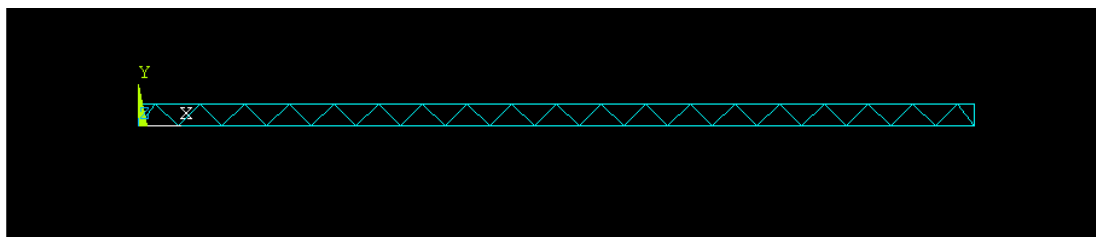


**Figura 24: Análise topológica com 60% de redução de volume**



**Figura 25: Análise topológica com 65% de redução de volume**

Com base nestes resultados foi decidido modelar a estrutura tubular com um passo médio de um metro e um ângulo de 40° entre as barras horizontais e as barras intermédias de reforço (fig. 26).



**Figura 26: Modelação inicial da estrutura tubular**

### 2.5.3. Análise de uma treliça

Foi feita uma nova validação do uso do MEF analisando a aplicação de um carregamento a meio vão de 5 000 kg numa treliça bidimensional (fig.26). Foi utilizado o método dos nós para a determinação da solução analítica. Os cálculos analíticos para obtenção das forças nas barras pelo método dos nós estão descritos no anexo C.

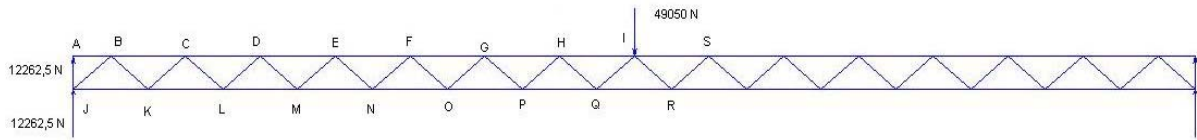
Tendo em consideração as dimensões do perfil INP 400 estudado anteriormente, foi analisado o perfil tubular de secção circular descrito na tabela 10 [12].

**Tabela 10: Características do perfil de secção circular [12] (Anexo D)**

| Referência  | Raio externo (mm) | Espessura (mm) | Área (mm <sup>2</sup> ) | Momento de Inércia (mm <sup>4</sup> ) |
|-------------|-------------------|----------------|-------------------------|---------------------------------------|
| T5380 (3'') | 44,5              | 7,62           | 1 948,2                 | 1,63x10 <sup>6</sup>                  |

Uma treliça pode ser considerada como um grupo de articulações e de barras submetidas à acção de duas forças, uma em cada extremidade [13]. Estas forças têm a mesma intensidade, a mesma linha de acção e sentidos opostos. A treliça pode ser decomposta e pode traçar-se um diagrama de corpo livre para cada articulação e cada barra. Além disso, a terceira lei de Newton indica que as forças de acção e reacção entre uma barra e uma articulação são iguais e opostas. Portanto, as forças exercidas por uma barra nas duas articulações a que esta se liga têm de estar dirigidas segundo o eixo da barra, e ser iguais e opostas. A intensidade comum das forças exercidas por uma barra nas duas articulações a que se liga é habitualmente referida como *esforço na barra* considerada. Uma vez que são conhecidas as linhas de acção de todas as forças interiores numa treliça, a sua análise reduz-se a calcular os esforços nas suas várias barras e a verificar se são de tracção ou de compressão.

Na figura 27 tem-se a descrição do problema estudado.

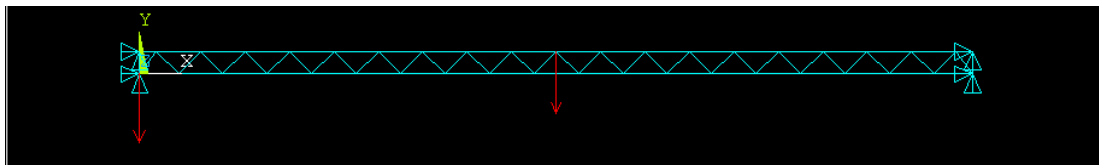


**Figura 27: Esquema da situação da estrutura tubular**

Na análise da estrutura através do ANSYS® foram feitos estudos com três tipos de elementos diferentes: o elemento BEAM, o elemento LINK 1 e o elemento PIPE 16. Para a modelação do problema (fig.28) utilizaram-se os parâmetros descritos na tabela 11 para a secção tubular de três polegadas descrita na tabela 10.

**Tabela 11: Parâmetros utilizados na modelação em ANSYS®**

|                          |  |
|--------------------------|--|
| Constantes               | $\text{Área} = 1\,948,2 \times 10^{-6} \text{ m}^2$<br>$I_{z-z} = 1,63 \times 10^{-6} \text{ m}^4$<br>Diâmetro <sub>ext</sub> do tubo = 89 mm<br>$t = 7,62 \text{ mm}$ (espessura da parede tubular)<br>$\rho = 7\,860 \text{ kg/m}^3$ |
| Propriedades do material | $E = 200 \times 10^9 \text{ Pa}$<br>$\nu = 0.3$  |
| Nº de nós                | 33   |
| Nº de elementos          | 62   |
| Carregamentos            | Encastramento nas extremidades<br>49 050 N a meio vão<br>Peso próprio  |



**Figura 28: Modelação do problema em ANSYS®**

Os resultados obtidos na obtenção das forças e tensões nas barras por ambos os métodos estão apresentados nas tabelas 12 e 13. As tabelas 12 e 13 mostram que relativamente à flecha existe uma diferença de 3% entre os valores obtidos por intermédio dos três tipos de elementos finitos analisados. Relativamente às forças e tensões máximas aplicadas nas barras, a comparação entre o método analítico e numérico revela diferenças

de 9% e diferenças de 3% entre as soluções apresentadas com os vários tipos de elementos finitos utilizados no método numérico.

**Tabela 12: Comparação de forças entre elementos**

|                               | Flecha (mm) | Força nas barras (N) |                  |
|-------------------------------|-------------|----------------------|------------------|
|                               |             | Máxima à compressão  | Máxima à tracção |
| Analítico<br>(método dos nós) | -           | 198 979              | 229 591          |
| Numérico<br>(elemento link1)  | 27,235      | 188 792              | 217 401          |
| Numérico<br>(elemento pipe16) | 26,413      | 183 089              | 209 897          |
| Numérico<br>(elemento beam3)  | 26,409      | 183 096              | 209 792          |

**Tabela 13: Comparação de Tensões entre elementos**

|                               | Tensões nas barras (MPa) |                  |
|-------------------------------|--------------------------|------------------|
|                               | Máxima à compressão      | Máxima à tracção |
| Analítico<br>(método dos nós) | 102,1                    | 117,8            |
| Numérico<br>(elemento link1)  | 96,9                     | 111,6            |
| Numérico<br>(elemento pipe16) | 93,9                     | 107,7            |
| Numérico<br>(elemento beam3)  | 93,9                     | 107,7            |

## Capítulo 3 – Determinação das tensões induzidas nas estruturas analisadas

### 3.1. Modelação

O presente trabalho em elementos finitos foi realizado com o auxílio do programa ANSYS®. O procedimento para efectuar a análise de determinada estrutura em elementos finitos segue normalmente três passos fundamentais, em primeiro lugar é definido o tipo de análise, em segundo é escolhido o tipo de elementos a utilizar e é feita a descrição geométrica da estrutura; por fim são aplicados os constrangimentos e carregamentos e é gerada a solução.

O modelo recriado tentou representar a estrutura actual reforçada do convés de voo o mais próximo possível da realidade. Para tal recorreu-se aos desenhos de pormenor da ré do navio, de modo a obter a correcta posição dos diferentes perfis utilizados (fig. 29), mas devido à complexidade do convés foram feitas algumas aproximações estruturais ao nível da forma, como por exemplo: foram omitidos os furos de passagem de tubagem existentes em alguns reforços; a antepara foi modelada como uma chapa contínua e sem reforços, quando na realidade a estrutura em questão possui aberturas para passagem e reforços.

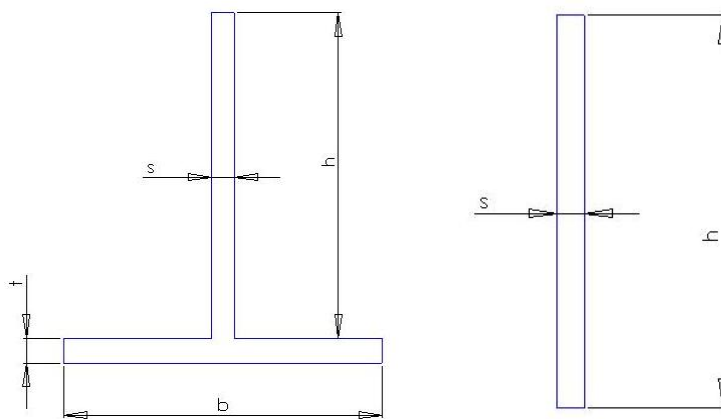


Figura 29: Tipos de perfis utilizados

A estrutura foi modelada criando, numa primeira parte, as linhas que definem os contornos dos reforços, convés, antepara e colunas e, numa segunda parte, as áreas que

definem esses mesmos elementos (fig. 30 e 31). A rotina da modelação e do estudo foi feita de forma modular, por forma a que todos os elementos e parâmetros criados pudessem ser facilmente modificados ou corrigidos *à posteriori*.

1  
AREAS  
TYPE NUM

ANSYS

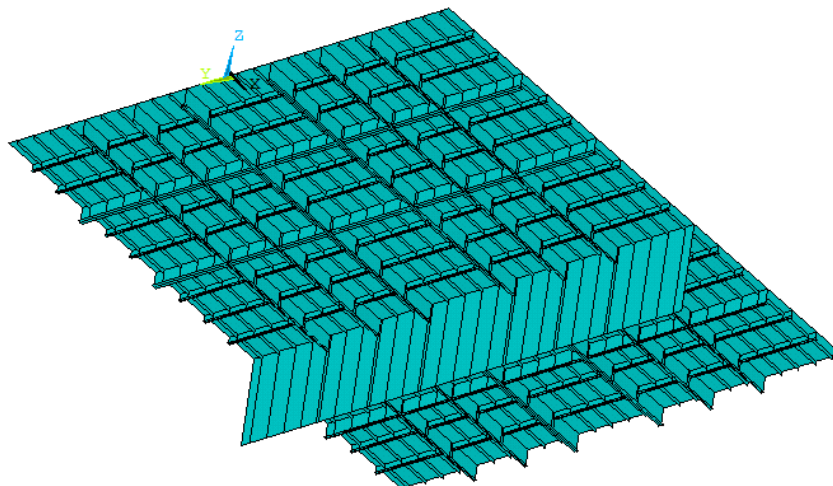


Figura 30: Modelação da estrutura em ANSYS®

1  
AREAS  
TYPE NUM

ANSYS

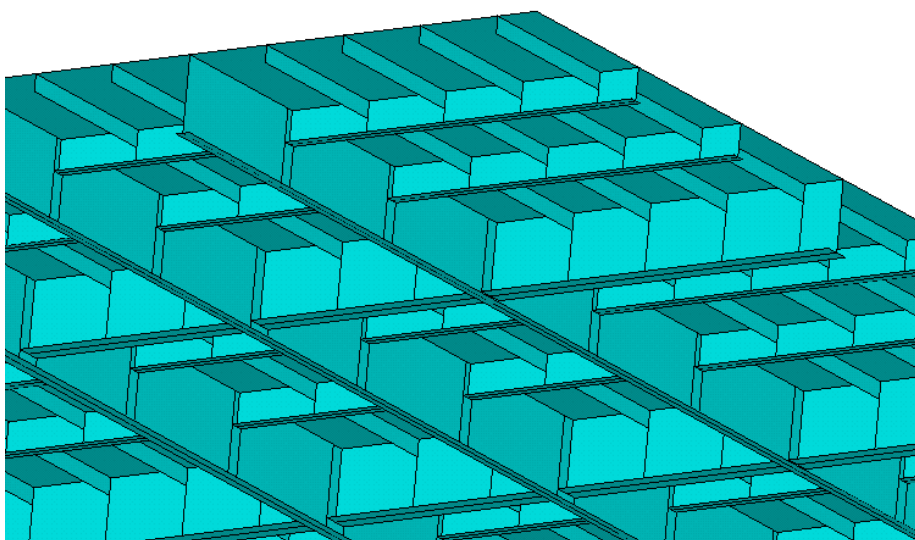


Figura 31: Vista de pormenor dos perfis modelados



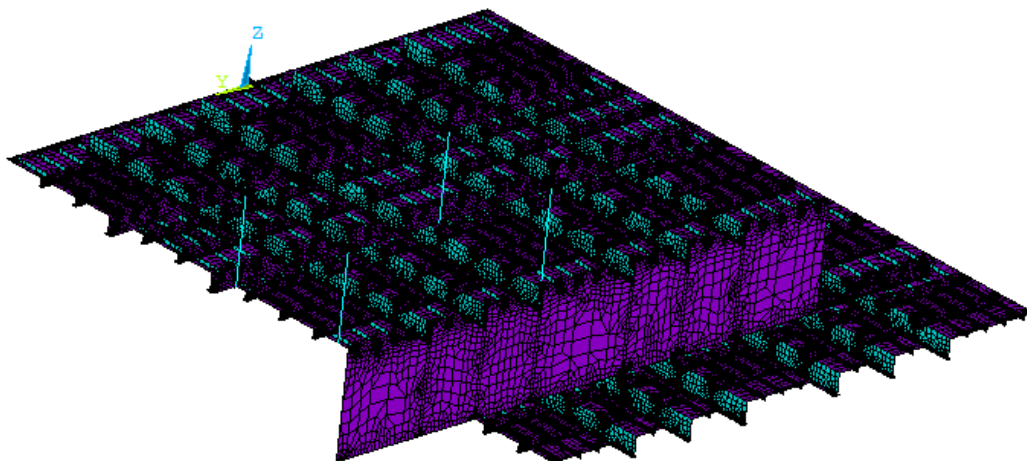
Na criação da malha de elementos finitos foi utilizado o comando *smartsize* para definir o nível de tamanho dos elementos para o menor possível, de forma a obter uma malha fina e uniforme.

O comando *smartsize*, primeiro estima o comprimento das arestas de todas as áreas a serem modeladas e divide as linhas de contorno das mesmas num número igual de divisões, de forma a que seja possível obter uma área só com elementos quadrangulares. De seguida o comando *smartsize*, refina os elementos onde houver formas curvas ou intersecções para melhorar a densidade da malha e possibilitar a convergência.

Foram utilizados elementos casca SHELL 63 para modelar os reforços, o convés de voo e a antepara e foram utilizados elementos tubulares PIPE 16 para modelar as colunas (fig. 32).

1  
ELEMENTS

ANSYS



**Figura 32: Malha da estrutura**

Na figura 33 podemos visualizar com mais pormenor a conectividade entre os elementos das várias entidades modeladas.

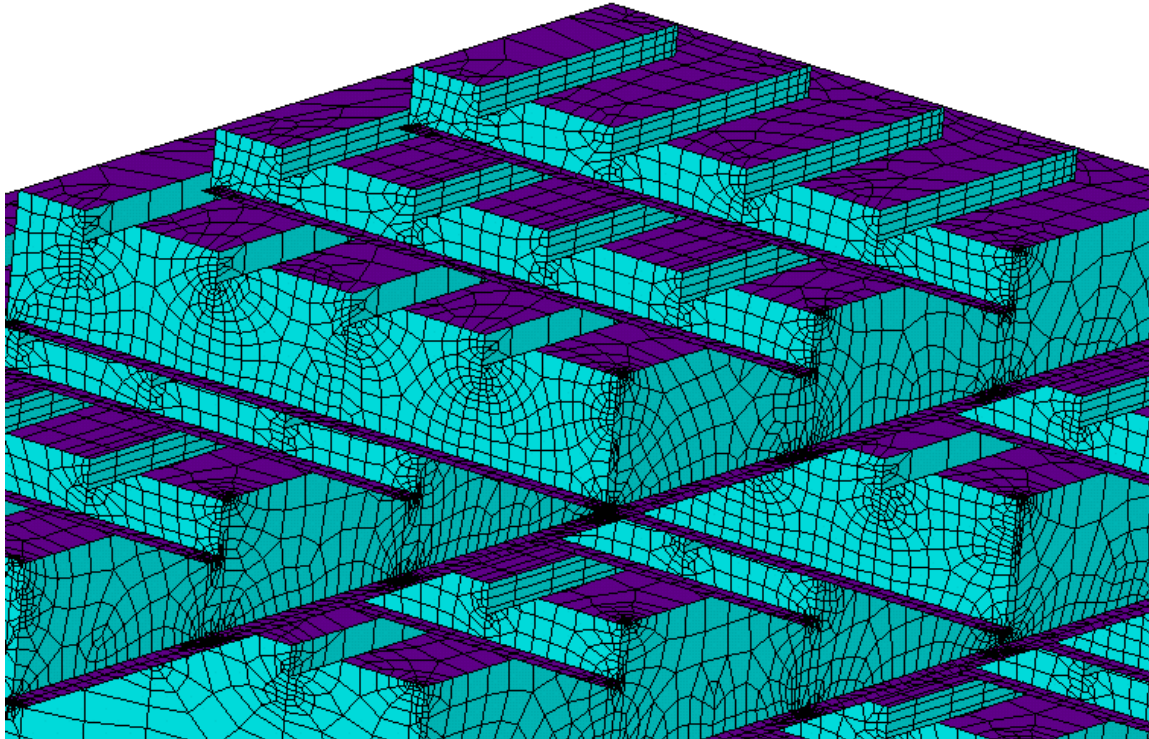


Figura 33: Pormenor da conectividade entre elementos

### 3.2. Condições de fronteira

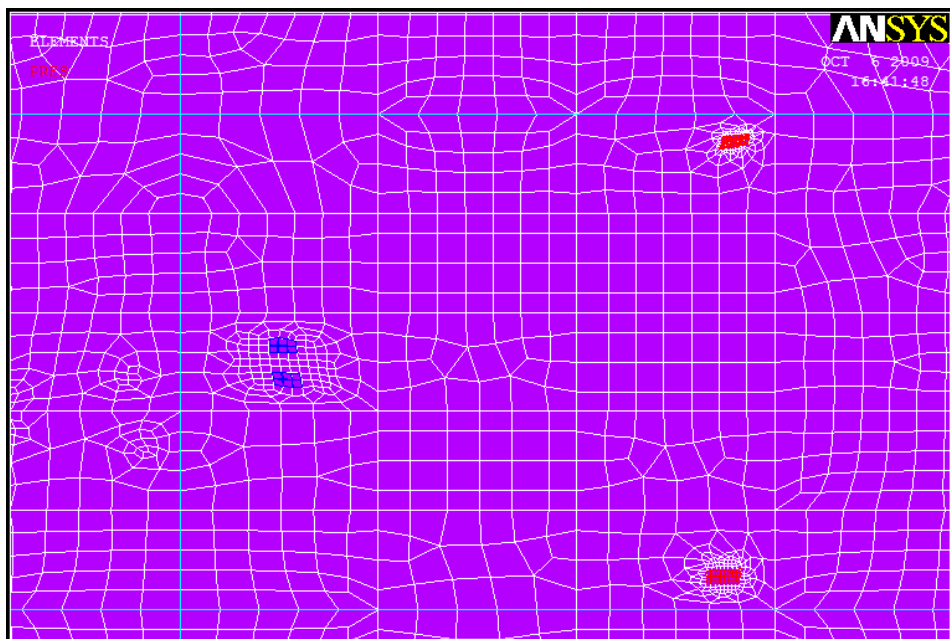
As condições de fronteira aplicadas ao modelo consistem nos constrangimentos e carregamentos aplicados. Os constrangimentos impostos na estrutura foram encastramentos nas extremidades do convés, da antepara e das colunas. A condição de encastramento não representa totalmente a realidade existente no convés de voo do navio, a qual poderá variar entre encastrado e apoiado. Para o carregamento aplicado foi considerado o peso do helicóptero sobre o qual incidiu um factor de segurança de 2,0. O factor de segurança já tem em conta os efeitos dinâmicos do navio e dos ventos. Foi considerado também o peso próprio da estrutura. O carregamento aplicado teve em consideração as dimensões das pegadas provocadas pelas rodas do helicóptero. Segundo dados do fabricante, para uma carga normal de serviço, tem-se uma massa de 5 126 kg e considerando a pior situação para cada roda vem que:

- Na condição de que o centro de gravidade esteja desviado de 78 mm na direção do nariz do helicóptero, a massa suportada pelo trem de aterragem frontal será de 2 083 kg sendo que cada roda suportará 1 041,5 kg, para uma pressão interior do pneu de 97 psi [2].

- Na condição de que o centro de gravidade esteja desviado de 43 mm na direção da cauda do helicóptero, a massa suportada por cada trem e roda traseiros será de 1 624 kg, para uma pressão interior do pneu de 117 psi. Nestas condições as áreas das pegadas provocadas pelas rodas são aproximadamente 25,8 polegadas quadradas para cada roda posterior e 17,9 polegadas quadradas para cada roda anterior [2].

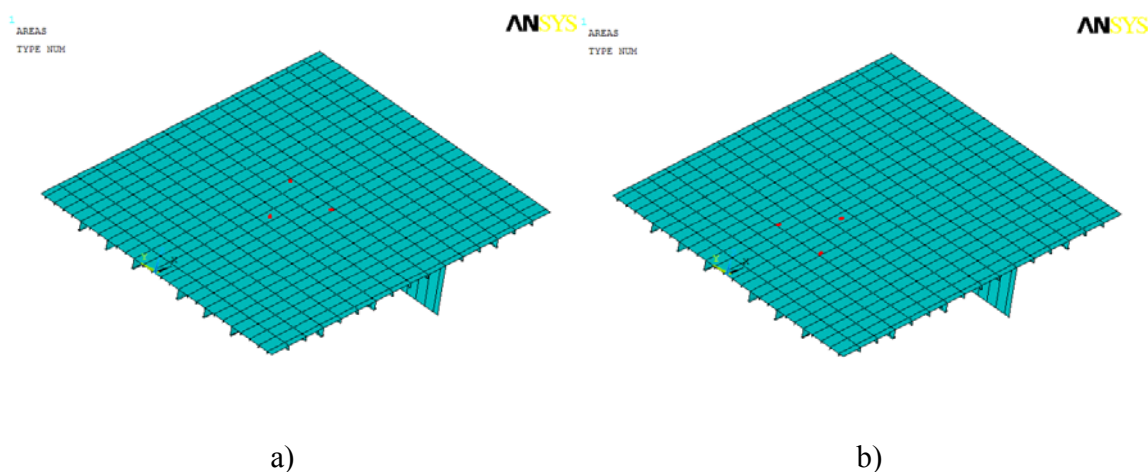
Para poderem ser aplicadas as cargas no modelo foi necessário estimar as dimensões dos lados dos retângulos resultantes das pegadas. Usando a conversão de polegadas para milímetros, vem que:  $1''^2 = 645,2\text{mm}^2$ . Obtém-se assim  $11\,549,08\text{ mm}^2$  para cada roda anterior e  $16\,646,16\text{ mm}^2$  para cada roda posterior. De acordo com as dimensões do helicóptero as rodas posteriores têm uma largura de 80 mm o que faz com que tenham de ter aproximadamente um diâmetro de 208 mm. Mantendo a mesma proporção nas rodas anteriores estima-se que devam ter 70 mm de largura por 165 mm de diâmetro.

O modelo em estudo não permite que forças sejam aplicadas em áreas. Portanto, foi necessário estimar a pressão equivalente para cada área de cada pegada. Aplicando  $P=F/A$  obteve-se uma pressão de 1 769 351 Pa para cada roda anterior e de 1 914 146 Pa para cada roda posterior. A figura 34 demonstra o carregamento aplicado no modelo.

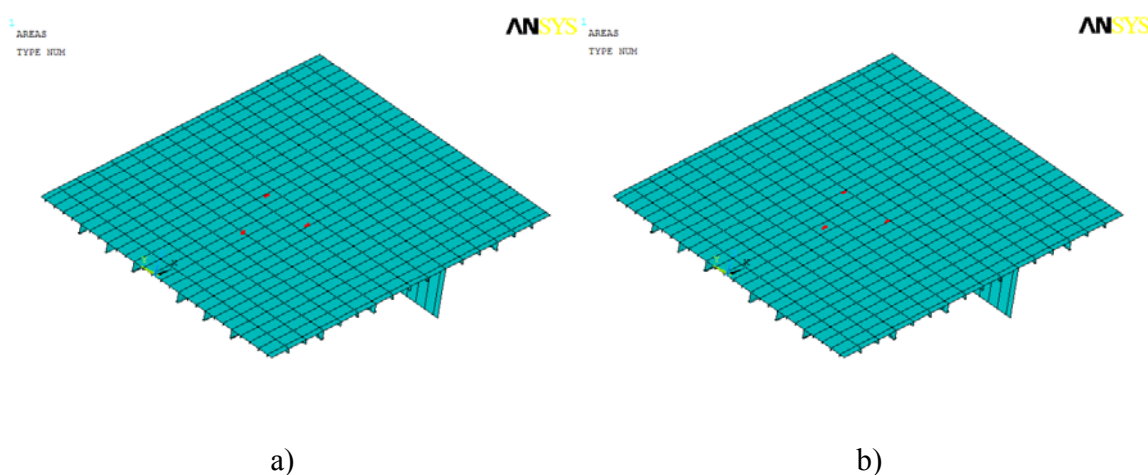


**Figura 34: Carregamento aplicado**

Foram feitos 4 estudos variando a posição do carregamento (figs. 35 e 36). A primeira posição (fig.35a) representa a situação em que o centro do helicóptero coincide com o centro do convés. É a posição normal de aterragem. A segunda posição (fig. 35b) representa a situação em que o centro do helicóptero coincide com o centro da secção compreendida entre a popa do navio e a antepara (compartimento M de acordo com os desenhos de pormenor do navio). A terceira posição representa a situação em que o trem frontal coincide com o centro da secção delimitada pelo compartimento M (fig.36a). A quarta posição (fig.36b) representa a situação em que o trem frontal coincide com o centro de uma área de chapa não apoiada, mais próxima do centro da secção delimitada pelo compartimento M. Esta posição é a menos apoiada. Nas figuras 35 e 36 podemos verificar as posições de carregamento relativamente ao convés de voo.



**Figura 35: Posições de carregamento 1 e 2**



**Figura 36: Posições de carregamento 3 e 4**

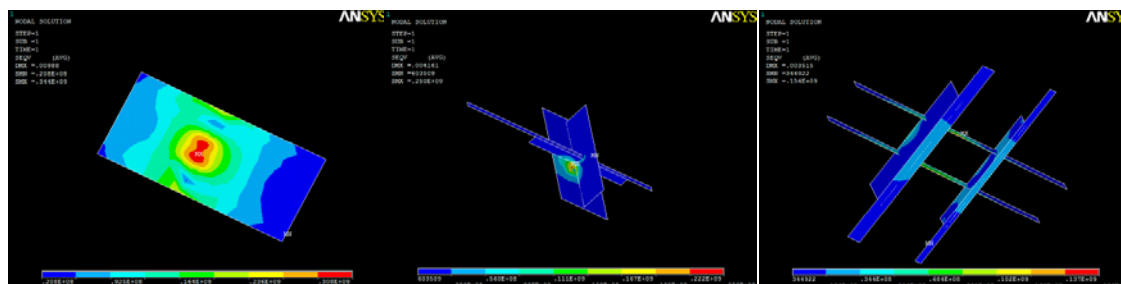
### 3.3. Estrutura actual

Para cada uma das quatro posições de carregamento foi verificada a distribuição de tensões nas várias entidades que constituem a estrutura (Tabela 14). Foram analisadas as tensões nas chapas onde incidem as pegadas, nos reforços adjacentes, nas colunas e na antepara.

**Tabela 14: Distribuição de tensões de *V. Mises* na estrutura actual**

|           | Na chapa, sob o trem frontal | Na chapa, sob o trem traseiro | Nos perfis de reforço adjacentes ao trem frontal/traseiro | Na antepara             | Na chapa dos perfis que ligam às colunas |
|-----------|------------------------------|-------------------------------|---|-------------------------|--|
| Posição 1 | $\sigma = 363\text{MPa}$     | $\sigma = 94\text{MPa}$       | $\sigma = 159\text{MPa}$                                  | $\sigma = 47\text{MPa}$ | $\sigma = 270\text{MPa}$                 |
| Posição 2 | $\sigma = 344\text{MPa}$     | $\sigma = 250\text{MPa}$      | $\sigma = 154\text{MPa}$                                  | $\sigma = 29\text{MPa}$ | $\sigma = 369\text{MPa}$                 |
| Posição 3 | $\sigma = 109\text{MPa}$     | $\sigma = 280\text{MPa}$      | $\sigma = 102\text{MPa}$                                  | $\sigma = 42\text{MPa}$ | $\sigma = 315\text{MPa}$                 |
| Posição 4 | $\sigma = 315\text{MPa}$     | $\sigma = 126\text{MPa}$      | $\sigma = 139\text{MPa}$                                  | $\sigma = 44\text{MPa}$ | $\sigma = 311\text{MPa}$                 |

De modo a ilustrar os valores apresentados na tabela 14, inclui-se a figura 37 relativa à distribuição de tensões nos vários elementos que constituem a estrutura, nomeadamente as zonas onde incidem as pegadas e os reforços adjacentes, para a posição de carregamento 2.



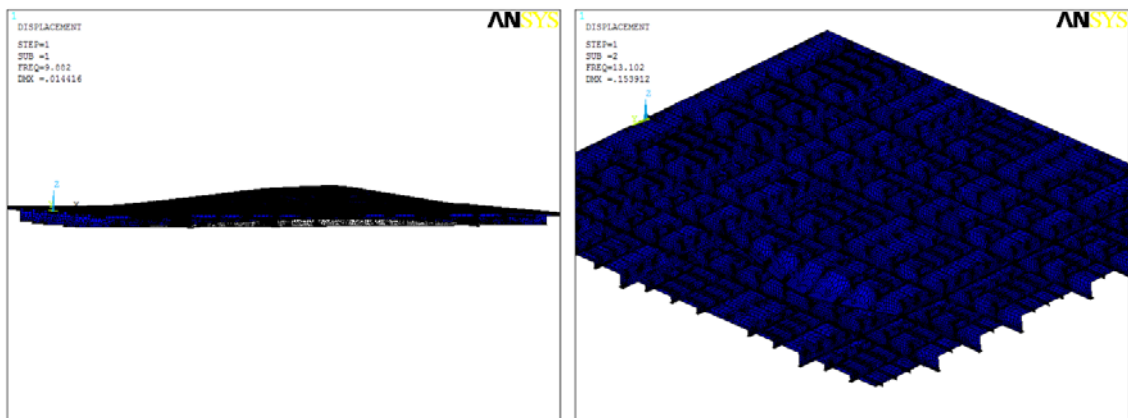
**Figura 37: Distribuição de tensões de *V. Mises* na estrutura actual para a posição de carregamento 2**

Foram verificadas também as quatro primeiras frequências naturais da estrutura, que estão apresentadas na tabela 15.

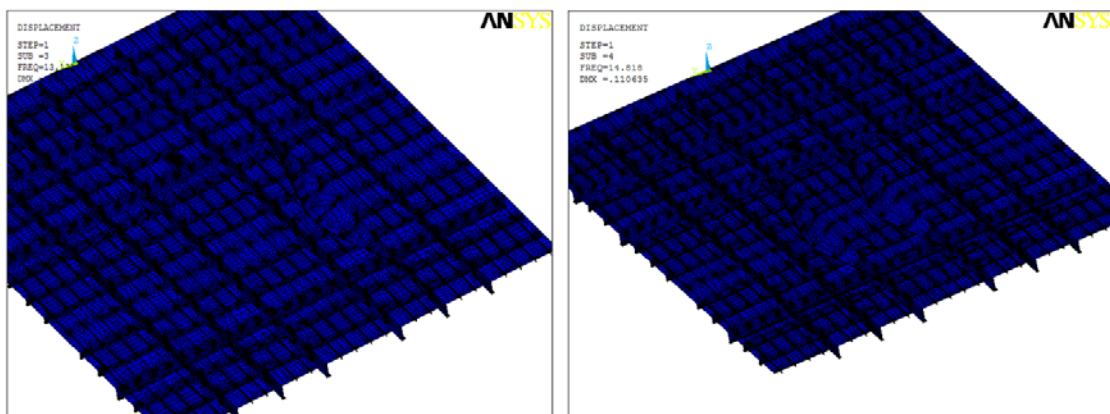
**Tabela 15: Frequências naturais da estrutura actual**

|                  | Massa (kg) | 1ª freq. (Hz) | 2ª freq. (Hz) | 3ª freq. (Hz) | 4ª freq. (Hz) |
|------------------|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Estrutura actual | 36 892     | 9,88          | 13,10         | 13,12         | 14,82         |

São também apresentados nas figuras 38 e 39 os quatro primeiros modos de vibração correspondentes.

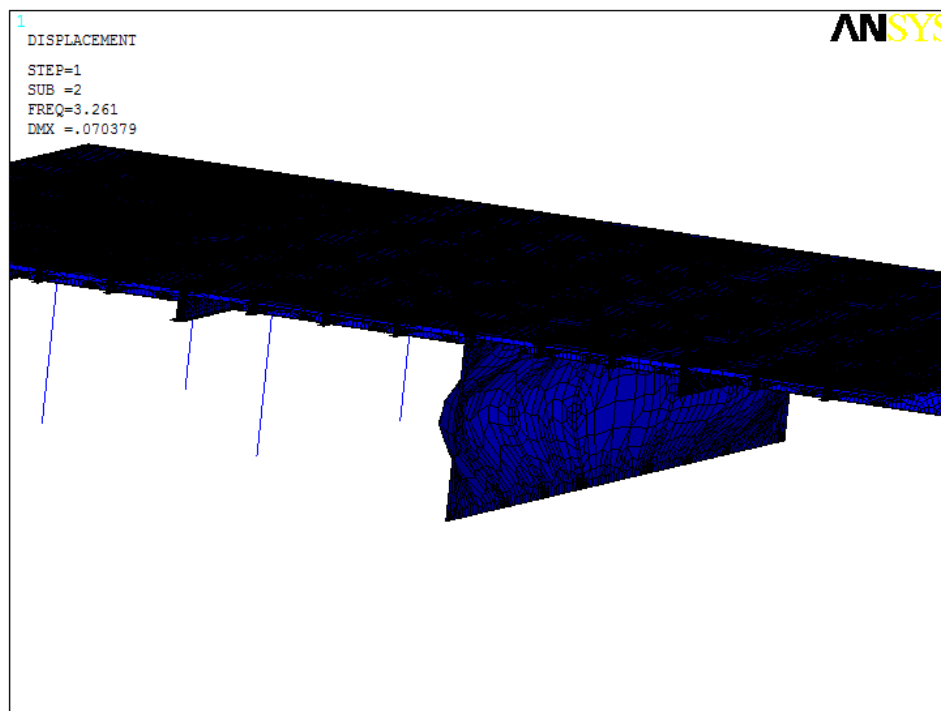


**Figura 38: Modos de vibração 1 e 2 na estrutura actual**



**Figura 39: Modos de vibração 3 e 4 na estrutura actual**

Os modos e frequências de vibração apresentados referem-se apenas ao convés de voo e aos reforços, tendo sido excluídas a antepara e as colunas. Os quatro primeiros modos e frequências de vibração obtidos para toda a estrutura incidem, apenas sobre a antepara (fig. 40) e são na ordem dos 3Hz.



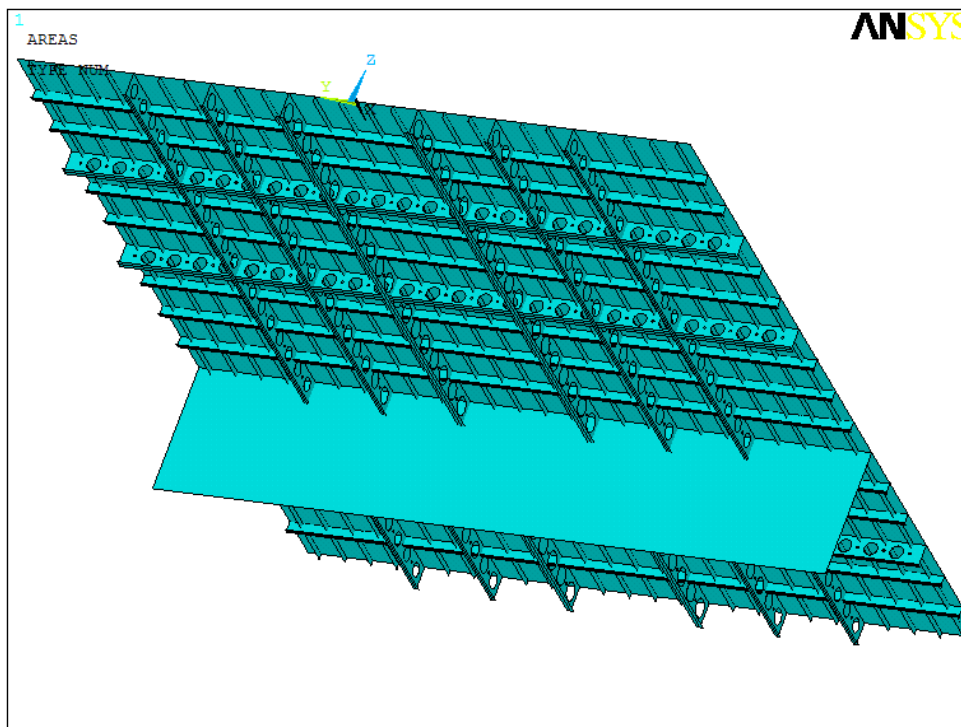
**Figura 40: Modo de vibração da antepara na estrutura actual completa**

### **3.4. Estruturas alternativas**

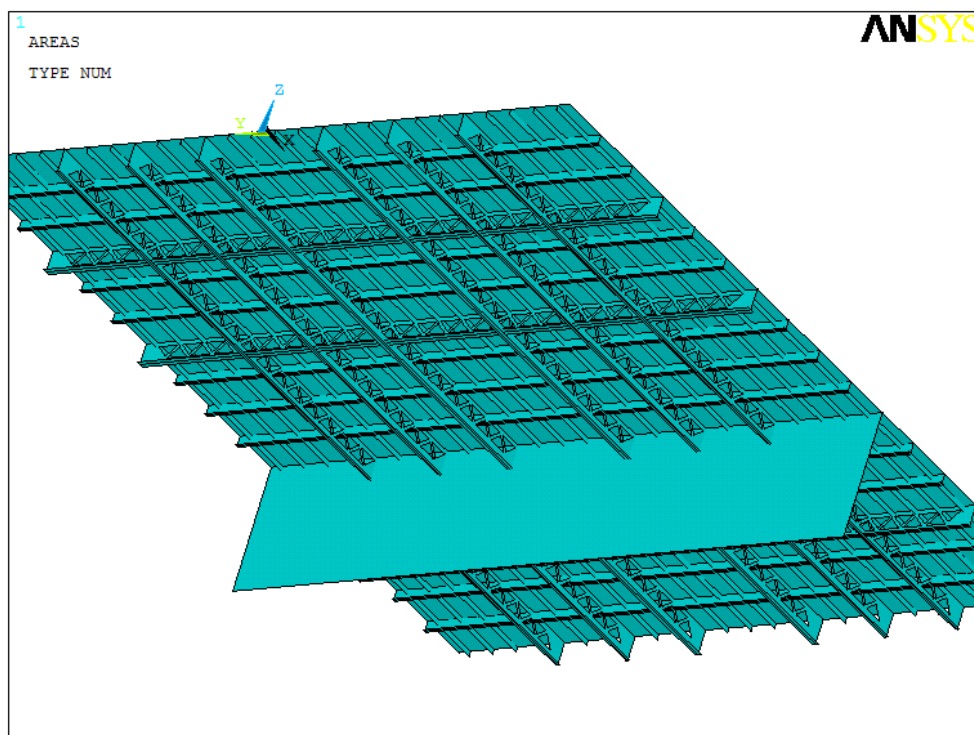
Para encontrar a estrutura com o melhor compromisso entre resistência e peso, foram modeladas e analisadas várias estruturas alternativas. Todas elas foram carregadas com as mesmas condições de fronteira que a estrutura real e foram também analisadas as mesmas posições de carregamento. Foram analisadas estruturas idênticas à estrutura actual, mas com recortes nos perfis, e também grelhas de elementos tubulares, com a mesma geometria entre si, mas com dimensões diferentes de diâmetro exterior e espessura de parede dos tubos utilizados.

Relativamente às estruturas alternativas com os perfis recortados foi modelada uma estrutura com recortes circulares nos perfis (fig. 41) e uma com recortes de forma triangular (fig. 42).





**Figura 41: Estrutura alternativa com recortes de forma circular**



**Figura 42: Estrutura alternativa com recortes de forma triangular**

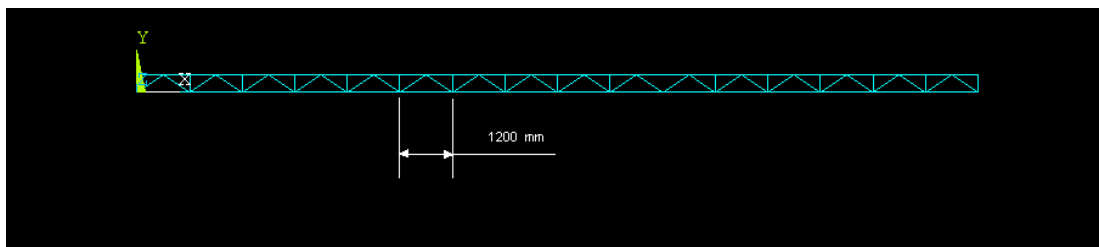


Estas duas estruturas alternativas foram analisadas, tendo sido obtidos valores de tensão de V. Mises inferiores à tensão de cedência do material. Contudo, a percentagem de redução de massa que poderia ser obtida com as estruturas indicadas é muito reduzida (Tabela 16) quando comparada com o trabalho/custo envolvido na produção das aberturas nos perfis de reforço. Deste modo, optou-se por fazer a modelação de uma estrutura alternativa com elementos tubulares com dois padrões (figs.43 e 44)

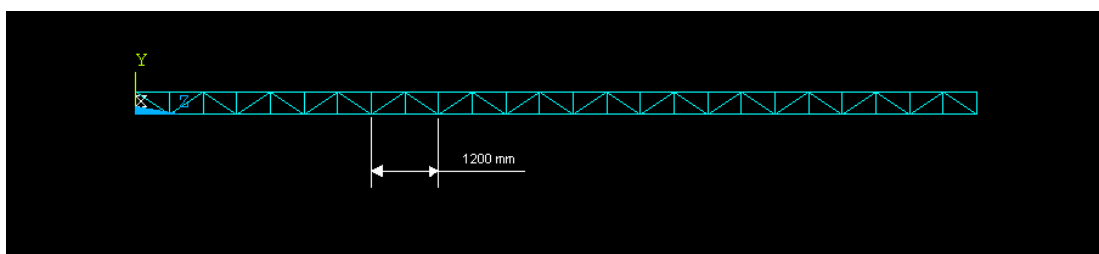
**Tabela 16: Percentagem de redução de massa nas estruturas alternativas com recortes**

|                       | Massa (kg) | Percentagem de redução de massa (%) |
|-----------------------|------------|-------------------------------------|
| Recortes circulares   | 35 864     | 2,8                                 |
| Recortes triangulares | 35 526     | 3,7                                 |

Relativamente às grelhas de elementos tubulares e para poderem ser enquadradas na estrutura do convés, o padrão da grelha tubular teve de ser alterado relativamente ao obtido na análise topológica. O padrão obtido anteriormente foi modelado com um passo de 1 m. Na implementação dos elementos tubulares na estrutura, foi mantido o afastamento existente entre os perfis. Esse afastamento, sendo de 1,2 m na direcção longitudinal (fig.43) e de 0,6 m na direcção transversal (fig.44), fez com que o padrão da grelha tubular fosse alterado para que fosse mantido esse afastamento.

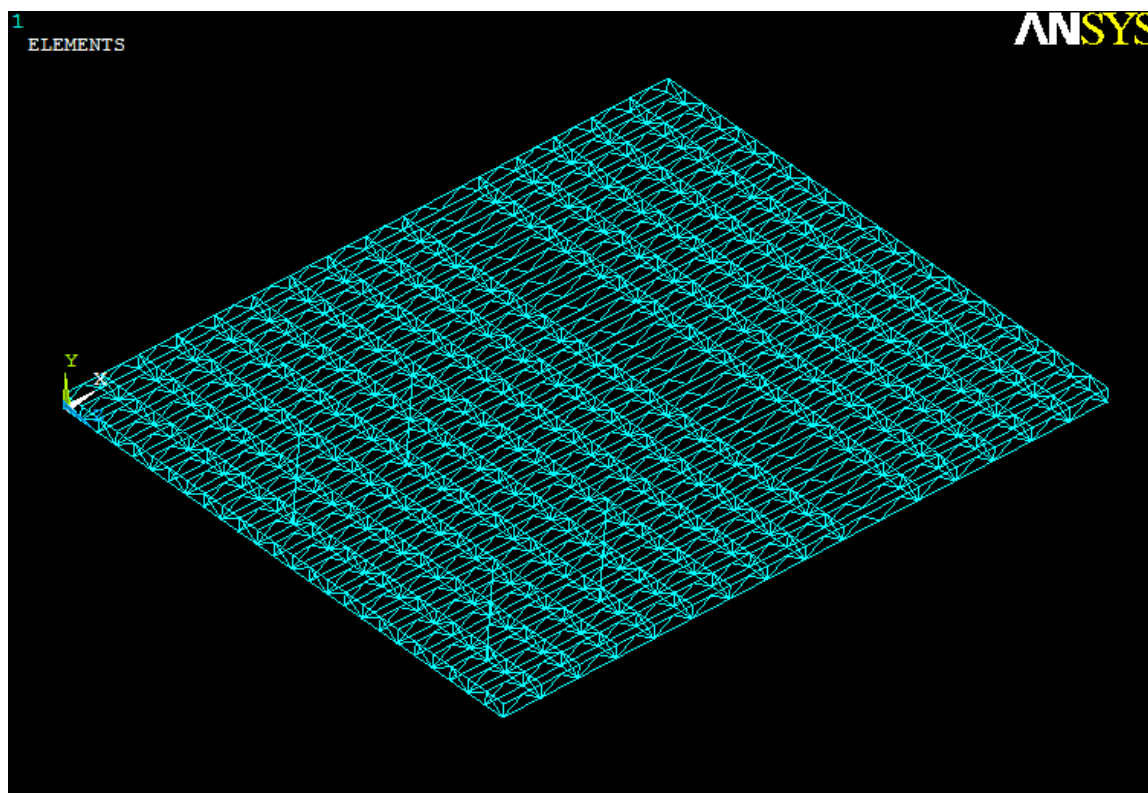


**Figura 43: Padrão longitudinal**

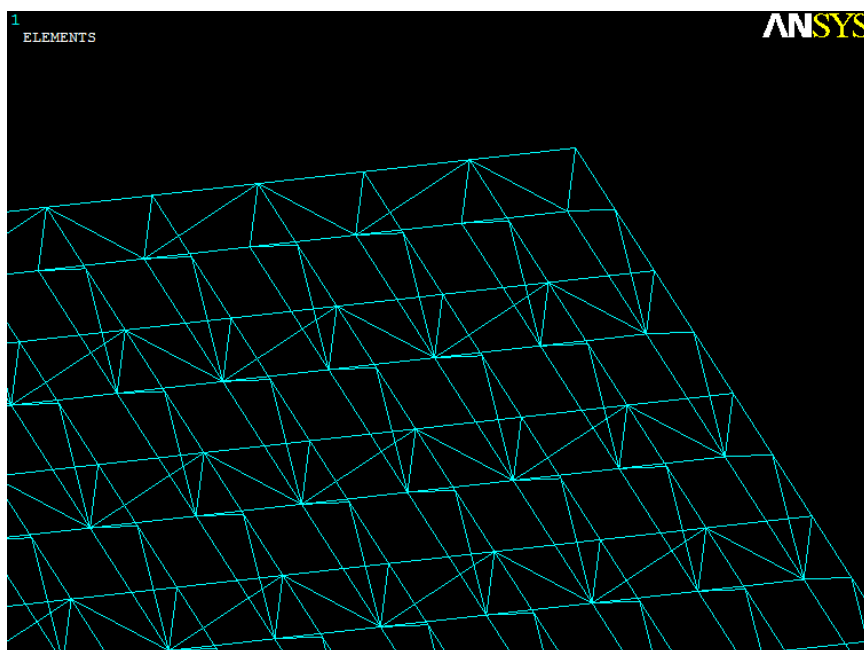


**Figura 44: Padrão transversal**

A estrutura alternativa proposta é a mostrada nas figuras 45 e 46, aqui modelada apenas a grelha de elementos tubulares:

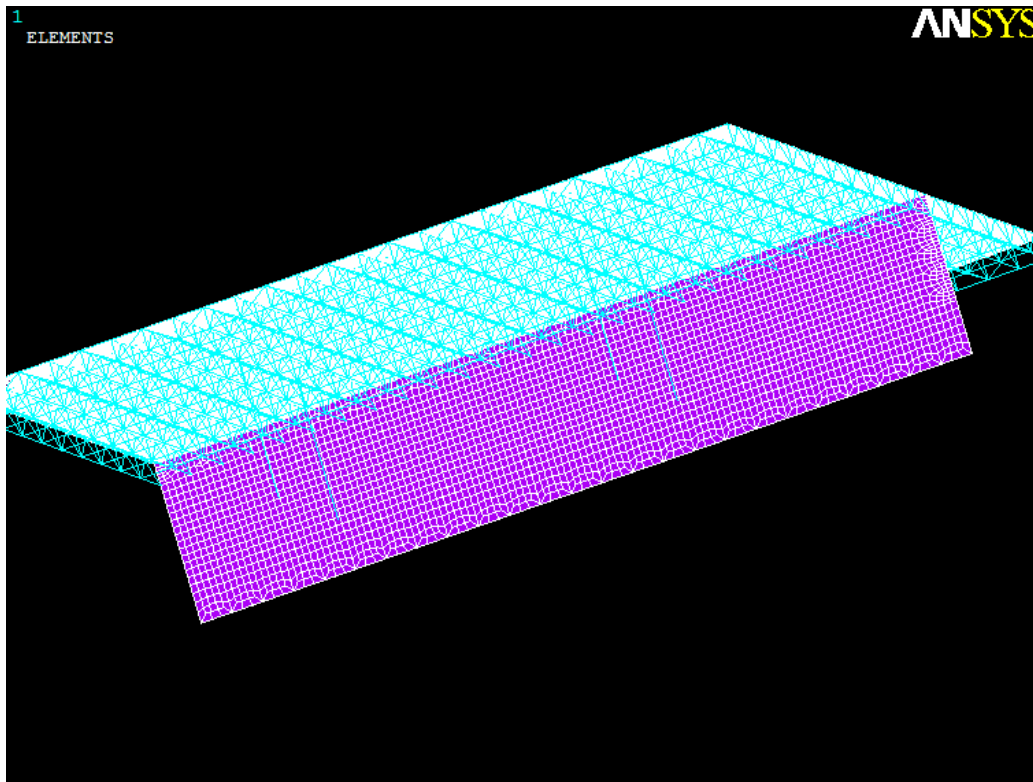


**Figura 45: Grelha de elementos tubulares da estrutura alternativa**



**Figura 46: Pormenor da grelha de elementos tubulares**

Na figura 47 mostra-se a estrutura alternativa completamente modelada.



**Figura 47: Modelação da estrutura alternativa**

As diferentes estruturas alternativas estudadas mantiveram a mesma geometria da grelha de elementos tubulares, mas foram analisados diferentes dimensões de tubos de acordo com a tabela 17.

**Tabela 17: Dimensões dos elementos tubulares**

| Estrutura alternativa | Ref <sup>a</sup> comercial | Diâmetro ext. (") | Espessura (") | Diâmetro ext. (mm) | Espessura (mm) | Área (mm <sup>2</sup> ) | Momento de inércia (mm <sup>4</sup> ) |
|-----------------------|----------------------------|-------------------|---------------|--------------------|----------------|-------------------------|---------------------------------------|
| 1                     | 3"                         | 3,500             | 0,300         | 88,900             | 7,620          | 1 948,2                 | 1,63x10 <sup>6</sup>                  |
| 2                     | 2"                         | 2,375             | 0,154         | 60,325             | 3,912          | 693,3                   | 2,77x10 <sup>5</sup>                  |
| 3                     | 1" ½"                      | 1,900             | 0,145         | 48,260             | 3,683          | 515,8                   | 1,29x10 <sup>5</sup>                  |
| 4                     | 1" ¼"                      | 1,660             | 0,140         | 42,164             | 3,556          | 431,3                   | 8,10x10 <sup>4</sup>                  |
| 5                     | 1"                         | 1,315             | 0,133         | 33,401             | 3,378          | 318,6                   | 3,64x10 <sup>4</sup>                  |
| 6                     | ¾"                         | 1,050             | 0,113         | 26,670             | 2,870          | 214,6                   | 1,54x10 <sup>4</sup>                  |
| 7                     | ½"                         | 0,840             | 0,109         | 21,336             | 2,769          | 161,5                   | 7,11x10 <sup>3</sup>                  |

De todas as dimensões estudadas, as que produziram resultados relevantes para os objectivos do trabalho (tensões induzidas inferiores à tensão de cedência do material de construção utilizado e, simultaneamente, massa do conjunto inferior à massa da estrutura actual<sup>1</sup>) são as mostradas nas tabelas 18 e 19:

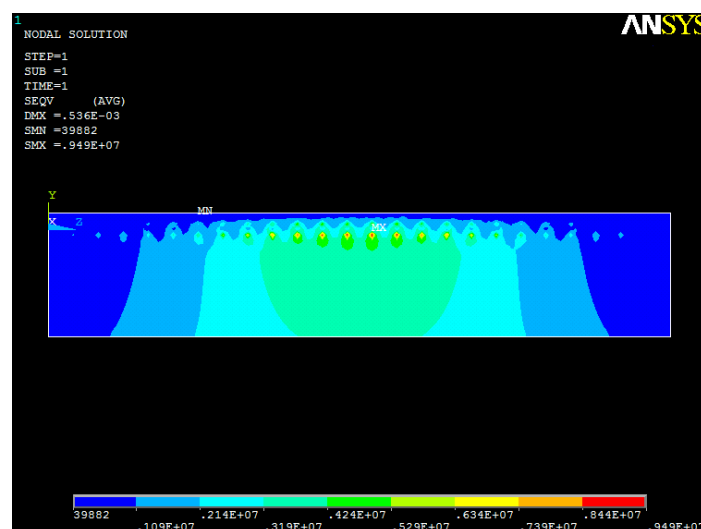
**Tabela 18: Distribuição de tensões na estrutura alternativa 3**

| Estrutura 3 | Na chapa, sob o trem frontal | Na chapa, sob o trem traseiro | Na estrutura tubular adjacente ao trem frontal/traseiro | Na antepara             | Na chapa dos perfis que ligam às colunas |
|-------------|------------------------------|-------------------------------|---|-------------------------|--|
| Posição 1   | $\sigma = 287\text{MPa}$     | $\sigma = 232\text{MPa}$      | $\sigma = 183\text{MPa}$                                | $\sigma = 95\text{MPa}$ | $\sigma = 100\text{MPa}$                 |
| Posição 2   | $\sigma = 287\text{MPa}$     | $\sigma = 259\text{MPa}$      | $\sigma = 207\text{MPa}$                                | $\sigma = 7\text{MPa}$  | $\sigma = 122\text{MPa}$                 |
| Posição 3   | $\sigma = 195\text{MPa}$     | $\sigma = 238\text{MPa}$      | $\sigma = 263\text{MPa}$                                | $\sigma = 9\text{MPa}$  | $\sigma = 126\text{MPa}$                 |
| Posição 4   | $\sigma = 305\text{MPa}$     | $\sigma = 225\text{MPa}$      | $\sigma = 189\text{MPa}$                                | $\sigma = 10\text{MPa}$ | $\sigma = 121\text{MPa}$                 |

**Tabela 19: Distribuição de tensões na estrutura alternativa 4**

| Estrutura 4 | Na chapa, sob o trem frontal | Na chapa, sob o trem traseiro | Na estrutura tubular adjacente ao trem frontal/traseiro | Na antepara             | Na chapa dos perfis que ligam às colunas |
|-------------|------------------------------|-------------------------------|---|-------------------------|--|
| Posição 1   | $\sigma = 294\text{MPa}$     | $\sigma = 241\text{MPa}$      | $\sigma = 224\text{MPa}$                                | $\sigma = 94\text{MPa}$ | $\sigma = 113\text{MPa}$                 |
| Posição 2   | $\sigma = 294\text{MPa}$     | $\sigma = 270\text{MPa}$      | $\sigma = 252\text{MPa}$                                | $\sigma = 7\text{MPa}$  | $\sigma = 138\text{MPa}$                 |
| Posição 3   | $\sigma = 195\text{MPa}$     | $\sigma = 246\text{MPa}$      | $\sigma = 321\text{MPa}$                                | $\sigma = 9\text{MPa}$  | $\sigma = 143\text{MPa}$                 |
| Posição 4   | $\sigma = 313\text{MPa}$     | $\sigma = 236\text{MPa}$      | $\sigma = 231\text{MPa}$                                | $\sigma = 10\text{MPa}$ | $\sigma = 138\text{MPa}$                 |

De modo a ilustrar os valores apresentados nas tabelas 18 e 19, incluem-se as figuras 48 e 49, relativas à distribuição de tensões nos vários elementos que constituem a estrutura 4, nomeadamente na antepara e nos elementos tubulares, para a posição de carregamento n.4.



**Figura 48: Distribuição de tensões na antepara para a estrutura 4 e carregamento 4**

<sup>1</sup> No Capítulo 3.5 – Discussão de Resultados os resultados obtidos serão analisados em maior detalhe.

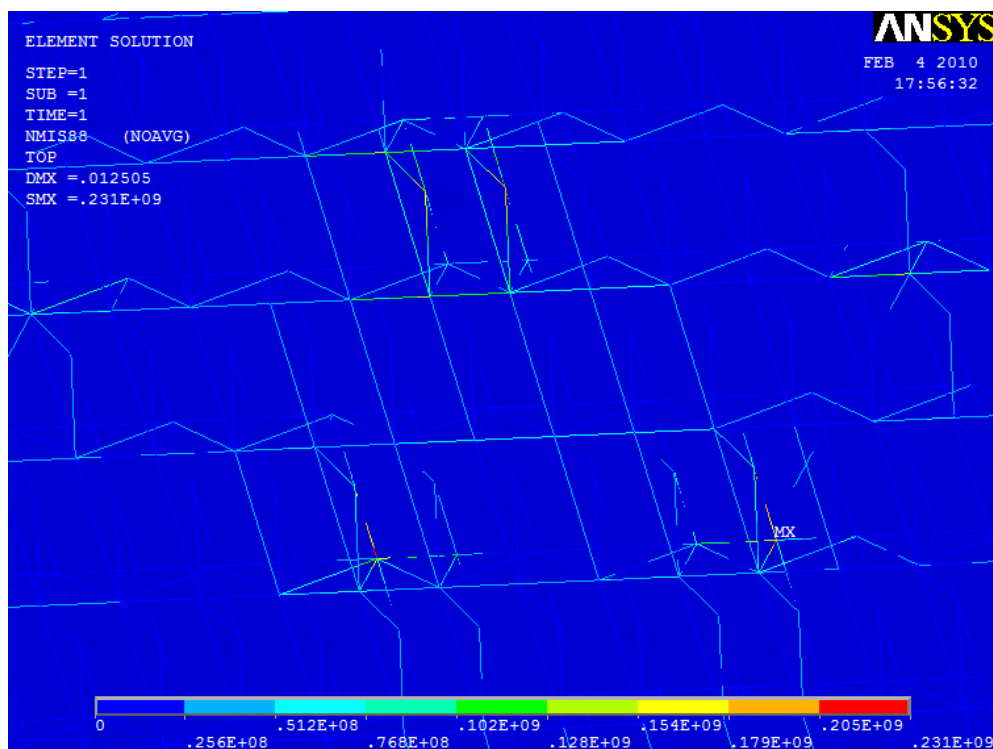


Figura 49: Distribuição de tensões nos elementos tubulares para a estrutura 4 e carregamento 4

Foram verificadas também as quatro primeiras frequências naturais das estruturas modeladas com elementos tubulares apresentadas na tabela 20.

Tabela 20: Frequências naturais das estruturas alternativas propostas

|             | Massa<br>(kg) | 1ª freq.<br>(Hz) | 2ª freq.<br>(Hz) | 3ª freq.<br>(Hz) | 4ª freq.<br>(Hz) |
|-------------|---------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Estrutura 3 | 34501         | 6,62             | 12,82            | 13,02            | 17,24            |
| Estrutura 4 | 32875         | 6,23             | 12,08            | 12,23            | 16,21            |

São também apresentados nas figuras 50 e 51 os quatro primeiros modos de vibração correspondentes.

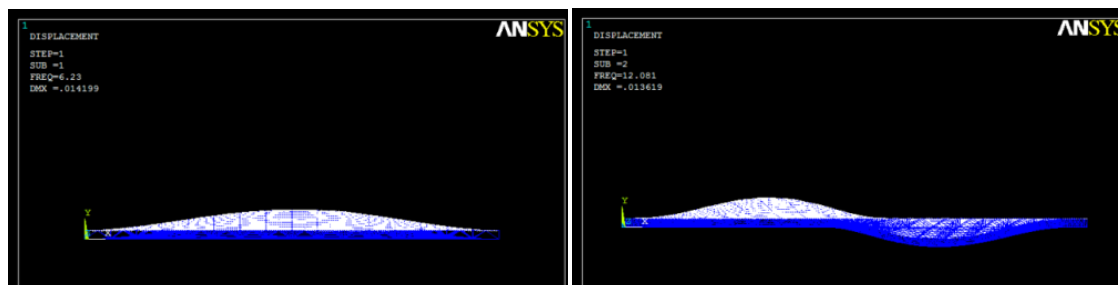


Figura 50: Modos de vibração 1 e 2 das estruturas alternativas

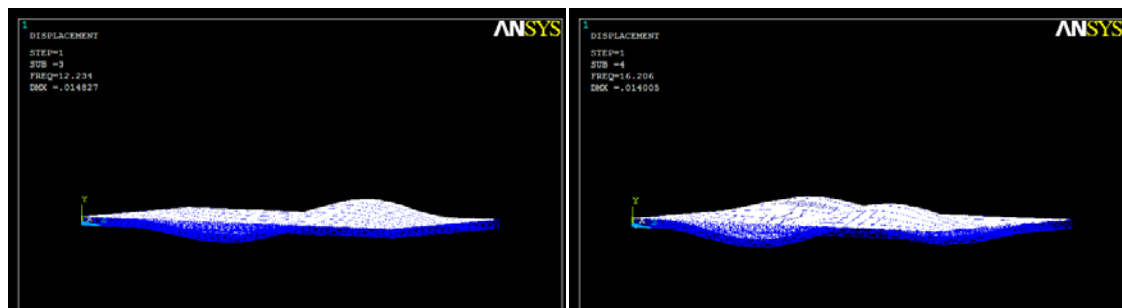


Figura 51: Modos de vibração 3 e 4 das estruturas alternativas

### 3.5. Análise e discussão de resultados

Dos resultados obtidos nos capítulos anteriores é possível verificar que o limite da tensão de cedência do material é ultrapassado em duas das análises feitas à estrutura actual quando o factor de segurança da carga é igual a 2 (Tabela 14). Isto deve-se ao elevado carregamento aplicado ao modelo analisado. No entanto esse valor será apenas tido em consideração como termo de referência para os resultados obtidos nas estruturas alternativas. Comparando as massas e deformadas de cada estrutura analisada obtém-se a tabela 21:

Tabela 21: Comparação de massa e deformada entre estruturas

| Estrutura | Massa    | Posição do carregamento | Flecha |
|-----------|----------|-------------------------|--------|
| Actual    | 36 892kg | Posição 1               | 10 mm  |
|           |          | Posição 2               | 10 mm  |
|           |          | Posição 3               | 6 mm   |
|           |          | Posição 4               | 9 mm   |
| 3         | 34 501kg | Posição 1               | 10 mm  |
|           |          | Posição 2               | 10 mm  |
|           |          | Posição 3               | 7 mm   |
|           |          | Posição 4               | 11 mm  |
| 4         | 32 875kg | Posição 1               | 11 mm  |
|           |          | Posição 2               | 12 mm  |
|           |          | Posição 3               | 9 mm   |
|           |          | Posição 4               | 13 mm  |

É possível verificar que as estruturas alternativas 3 e 4 têm reduções de massa de 6% e 11% respectivamente, comparadas com a estrutura actual, sem que o nível de tensões na estrutura ultrapasse o valor de cedência (tabelas 18 e 19). As estruturas 3 e 4 modeladas com elementos tubulares sofrem deformadas mais elevadas que a deformada máxima da estrutura actual, valores esses que aumentam também com a variação da posição do carregamento. A posição de carregamento 4, não sendo o ponto de aterragem do helicóptero é a posição onde há menos apoio e onde se verificam os valores maiores de deformada (tabela 21). Na posição 3 a deformada é menor pois a pegada do helicóptero incide sobre um reforço, mas no entanto o nível de tensões induzidas nos elementos tubulares é superior (tabelas 18 e 19).

As estruturas 3 e 4, quando comparadas com a estrutura actual, têm uma menor tensão induzida na zona de ligação da estrutura tubular com as colunas pois existe uma maior distribuição de tensões pelos vários elementos tubulares que as constituem.

Os valores de tensão induzida na estrutura tubular são maiores na estrutura 4 do que na estrutura 3 devido à menor secção dos elementos tubulares.

Relativamente às restantes estruturas alternativas, os resultados não satisfaziam os objectivos do trabalho: tensões induzidas inferiores à tensão de cedência do material de construção utilizado e, simultâneamente, massa do conjunto inferior à massa da estrutura actual. As estruturas 1 e 2 (tabela 17), apesar de terem tensões induzidas inferiores às de cedência (tabela 22), têm uma massa superior à da estrutura actual; as restantes, estruturas alternativas nºs 5, 6 e 7, têm níveis de tensão superiores ao valor de cedência do material, apesar de possuírem massa inferior à da estrutura actual (como se verifica na tabela 22).

**Tabela 22: Comparação de resultados entre todas as estruturas alternativas. Factor de segurança 2,0**

| Estrutura alternativa | Flecha <sub>max</sub> (mm) | $\sigma_{max}$ (MPa) | Massa (kg) | % Variação de massa |
|-----------------------|----------------------------|----------------------|------------|---------------------|
| 1                     | 7                          | 283                  | 62934      | +70                 |
| 2                     | 9                          | 295                  | 38276      | +4                  |
| 3                     | 11                         | 305                  | 34501      | -6                  |
| 4                     | 13                         | 321                  | 32875      | -11                 |
| 5                     | 15                         | 412                  | 30575      | -17                 |
| 6                     | 19                         | 467                  | 28510      | -23                 |
| 7                     | 23                         | 497                  | 27446      | -26                 |

Se se tiver em consideração um factor de segurança de 1,5 [5], obter-se-iam os resultados apresentados na tabela 23. Os resultados apresentados correspondem apenas às estruturas alternativas onde existiu redução de massa.

**Tabela 23: Comparação de resultados com factor de segurança 1,5**

| Estrutura alternativa | Flecha <sub>max</sub> (mm) | $\sigma_{\max}$ (MPa) | Massa (kg) | % Variação de massa |
|-----------------------|----------------------------|-----------------------|------------|---------------------|
| 3                     | 9                          | 229                   | 34501      | -6                  |
| 4                     | 10                         | 241                   | 32875      | -11                 |
| 5                     | 12                         | 310                   | 30575      | -17                 |
| 6                     | 15                         | 351                   | 28510      | -23                 |
| 7                     | 18                         | 374                   | 27446      | -26                 |

Considerando um factor de segurança de 1,5 no carregamento é possível verificar uma redução nos valores da flecha e das tensões induzidas na estrutura. Nesta condição, a estrutura alternativa 5 permitiria uma redução de massa de até 17% mantendo um nível de tensões e deformações inferior ao da estrutura 4 analisada com um factor de 2,0. No limite, a redução de massa poderia ser da ordem dos 23% (Tabela 23), uma vez que a carga aplicada incorpora um factor de segurança de 1,5 e as tensões máximas de V. Mises induzidas na estrutura (Tabela 23) são da ordem de grandeza da tensão de cedência do material utilizado (Tabela 3).

Relativamente ao estudo das frequências naturais da estrutura, deve-se garantir que estas não se encontram dentro das frequências de funcionamento do navio. As principais fontes de vibração no navio são os motores, a ondulação marítima e o funcionamento do próprio helicóptero.

No presente modelo não faz sentido considerar a antepara no estudo das frequências naturais pois devido às simplificações estruturais assumidas os primeiros modos de vibração obtidos seriam todos relativos à antepara.

O valor da 1ª frequência natural correspondente ao 1º modo de vibração nas estruturas alternativas é também inferior face ao valor na estrutura actual. Os restantes modos de vibração obtidos na estrutura actual correspondem apenas a reforços e não à estrutura como um todo. Foram ainda analisadas as colunas das estruturas no que diz respeito à encurvadura provocada por um carregamento axial de compressão. Recorrendo à formula de Euler [10]:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (9)$$

e à equação (1) do capítulo 2.2, conclui-se que a tensão crítica a partir da qual ocorre a encurvadura das colunas é  $\sigma=474\text{MPa}$  ( $I=3,65\text{e-}6\text{m}^4$ , para secção circular de 120 mm de diâmetro exterior e 6,3 mm de espessura de parede;  $L=2\ 600\text{ mm}$ ). O valor obtido é



bastante superior à tensão de cedência do material e consequentemente ao valor de tensão induzido nas colunas, relativamente às estruturas alternativas propostas.

## Capítulo 4 - Conclusões

A complexa estrutura do convés de voo obrigou a uma série de aproximações que se revelaram bastante satisfatórias. Para os estudos efectuados, os constrangimentos por encastramento revelaram ser uma boa aproximação, embora não correspondam exactamente à realidade.

Também o carregamento aplicado é uma aproximação pois devido a limitações de modelação do método utilizado não foi possível garantir as dimensões exactas das pegadas das rodas do helicóptero. Essa aproximação foi compensada com um elevado factor de segurança ao carregamento e com a aplicação simultânea das piores condições para cada trem de aterragem, situação que também não corresponde exactamente à realidade.

A posição de carregamento 4 revelou ser o local de aterragem que provoca a maior deformada, pois corresponde à situação em que o trem anterior incide sobre a secção menos apoiada. No entanto, o local designado para uma aterragem normal será a posição de carregamento 1.

A posição de carregamento 3 revelou ser, nas estruturas alternativas, o local de aterragem que induz um valor de tensão maior sobre os reforços, pois corresponde à situação em que o trem frontal incide directamente sobre os mesmos.

Mesmo tratando-se de um modelo em elementos finitos aproximado, os vários estudos demonstraram que as estruturas alternativas propostas são capazes de suportar as condições de carregamento impostas, tendo ao mesmo tempo uma redução de massa de 6% e 11% (quando se considera um factor de segurança para a carga de 2).

Considerando um factor de segurança de 1,5 a percentagem de redução de massa poderia chegar aos 17% mantendo um nível de tensões e deformações inferior ao da estrutura 4 analisada com um factor de 2,0. No limite, a redução de massa poderia ser da ordem dos 23% (Tabela 23), uma vez que a carga aplicada incorpora um factor de segurança de 1,5 e as tensões máximas de V. Mises induzidas na estrutura (Tabela 23) são da ordem de grandeza da tensão de cedência do material utilizado (Tabela 3).

Em vez de utilizar factores de segurança, poder-se-iam determinar envelopes de utilização com a aplicação de carregamentos limite, onde os reforços actuariam no limite da elasticidade e as chapas um pouco além do limite da plasticidade.

Para trabalhos futuros o modelo poderá incluir uma análise topológica à área que define o convés de voo para se poder aferir a possibilidade de diminuição da espessura do mesmo nas zonas circundantes às mais solicitadas. Tendo em consideração que apenas a massa da chapa de 10 mm que representa o convés são cerca de 22 000 kg, o que corresponde a 60% da massa total da estrutura, por cada milímetro de espessura retirado ao convés de voo significaria uma redução de massa de 6%. Não sendo possível retirar 1 mm de espessura em toda a dimensão do convés de voo, se da análise topológica se verificasse que seria possível uma redução de 1 mm em pelo menos 50% da área representada pelo convés, essa situação representaria um ganho em massa adicional de 3%.

Poderão ser estudadas também estruturas híbridas que misturem perfis com elementos tubulares. Estas alternativas, não sendo tão leves como as propostas, poderão ser favoráveis na relação custo/ benefício.

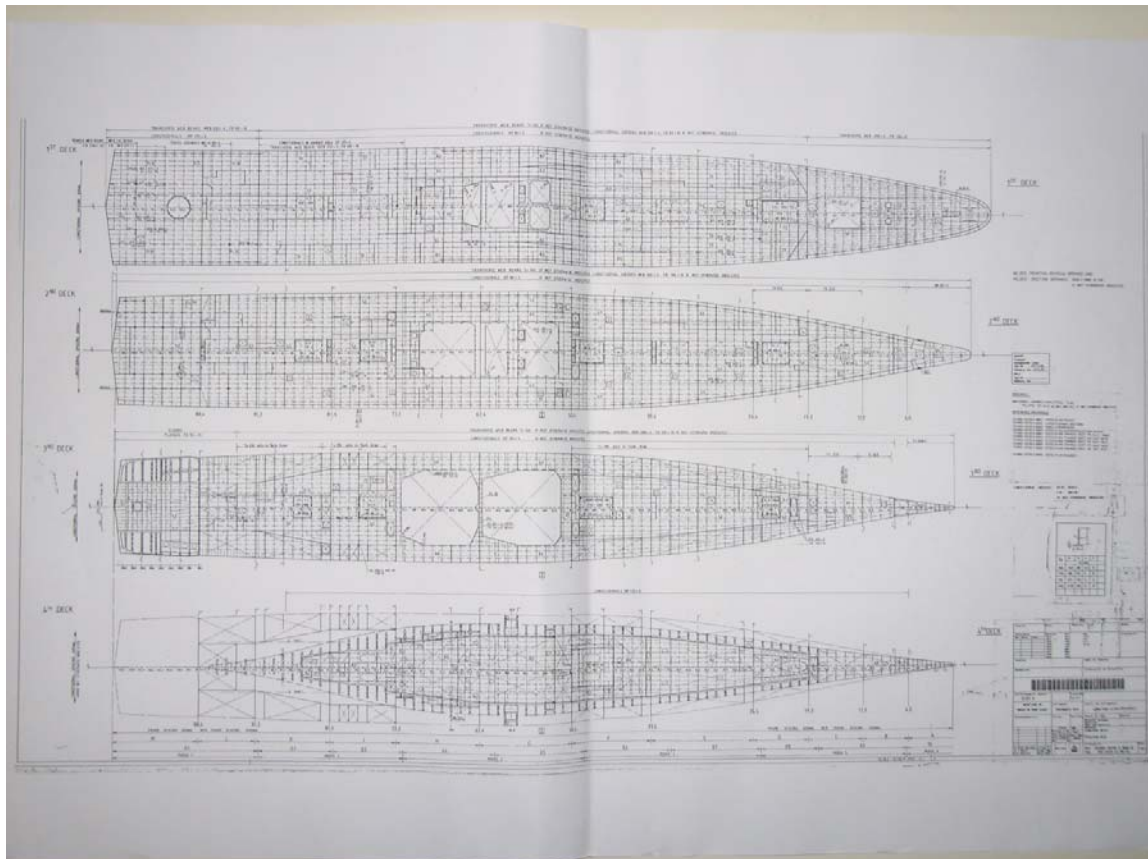
## Referências bibliográficas

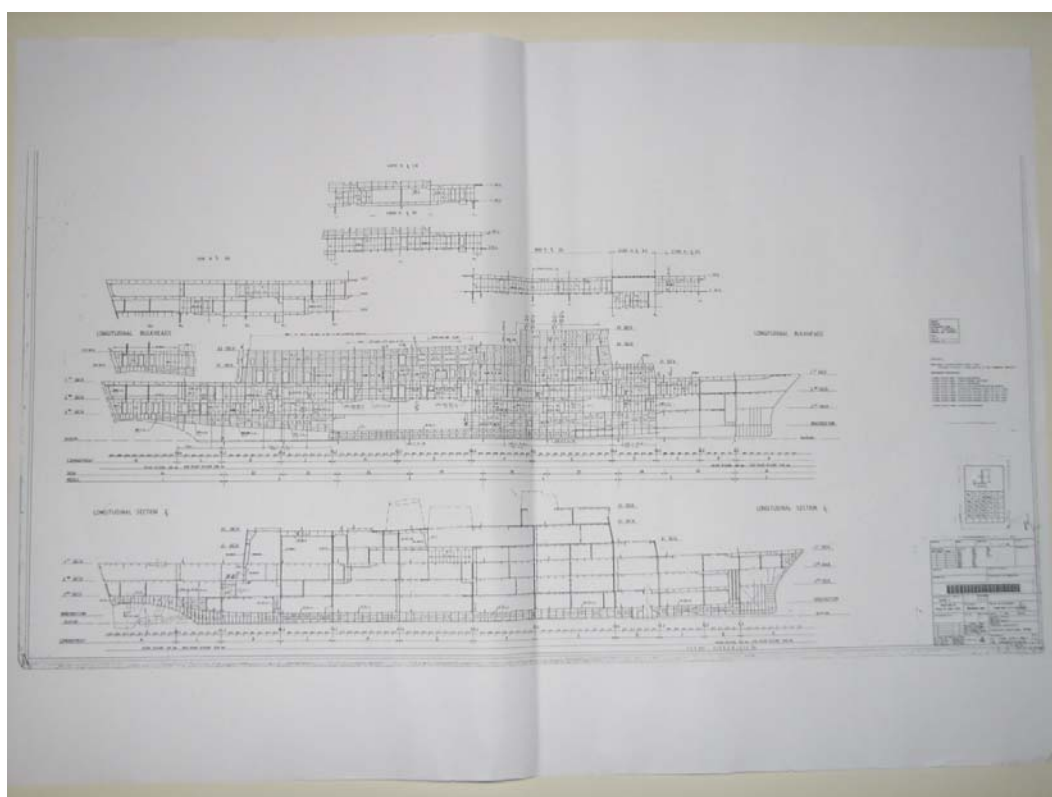
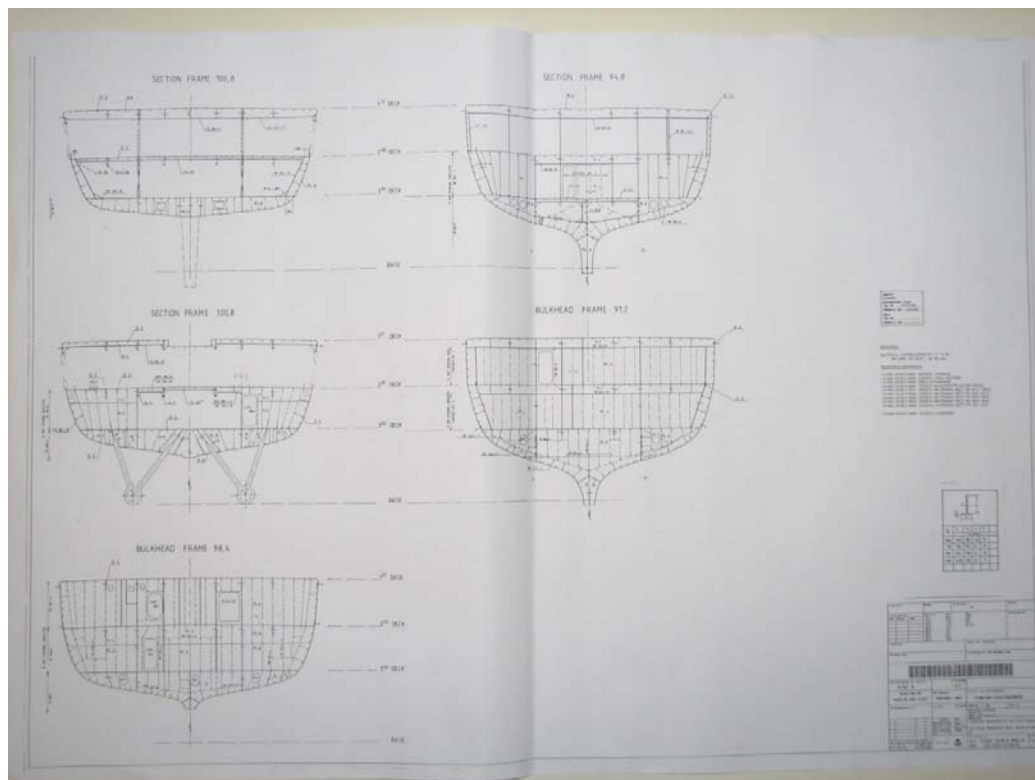
- [1] <http://www.marinha.pt/PT/amarinha/meiosoperacionais/superficie/classevascodagama/>
- [2] [http://www.agustawestland.com/products01\\_01.php?id\\_product=24](http://www.agustawestland.com/products01_01.php?id_product=24)
- [3] <http://estruturasarquitectonicas.blogspot.com/2009/07/vii-estudo-basico-das-trelicas-1-parte.html>
- [4] <http://www.matweb.com/>
- [5] [http://en.wikipedia.org/wiki/Factor\\_of\\_safety](http://en.wikipedia.org/wiki/Factor_of_safety)
- [6] Chalmers D. W., Design of Ships' Structures, H M S O – Ministry of Defense.
- [7] Lloyd, Germanischer, Rules for Classification and Construction, III Naval Ship Technology. s.l. : Germanischer Lloyd, 2004.
- [8] Moaveni, Saeed, (1999), Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS, Prentice Hall.
- [9] Azevedo, Álvaro F. M., (2003), Método dos Elementos Finitos, 1ª edição, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [10] Coelho, Pedro Samuel Gonçalves, (2003), Meta-Heurísticas Aplicadas em Optimização Estrutural.
- [11] Beer, Ferdinand P., Johnston, Jr, E. Russel, DeWolf, John T., (2003), Mecânica dos Materiais, 3ª edição, McGraw Hill.
- [12] <http://www.metalsdepot.com/>
- [13] Beer, Ferdinand P., Johnston, Jr, E. Russel, (1998), Mecânica Vectorial Para Engenheiros Estática, 6ª edição, McGraw Hill.

## Anexos

### Anexo A:

Desenhos de pormenor da fragata.





## Anexo B:

Procedimento e cálculos para a validação do método numérico na situação descrita no capítulo 2.5.1.

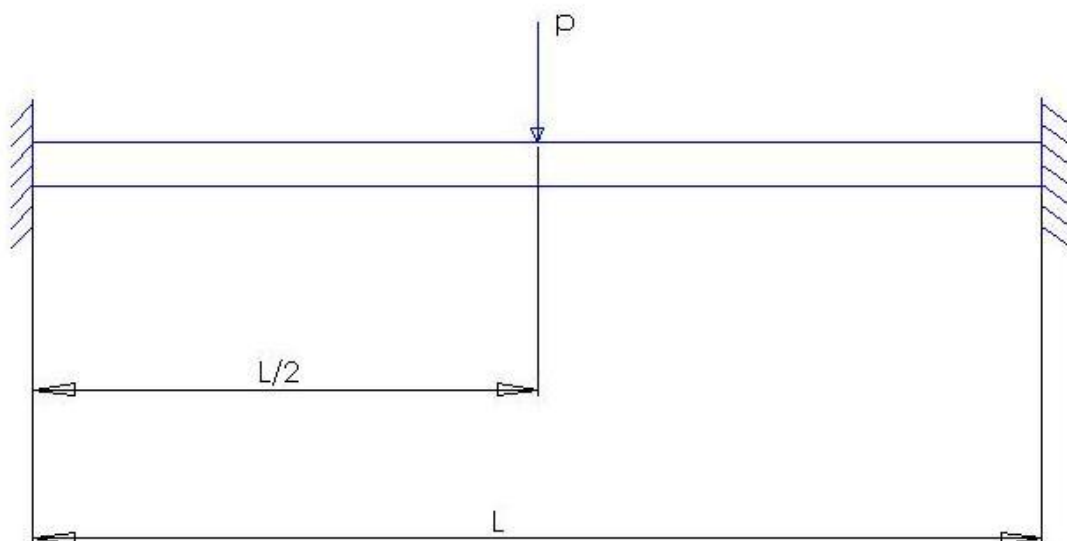
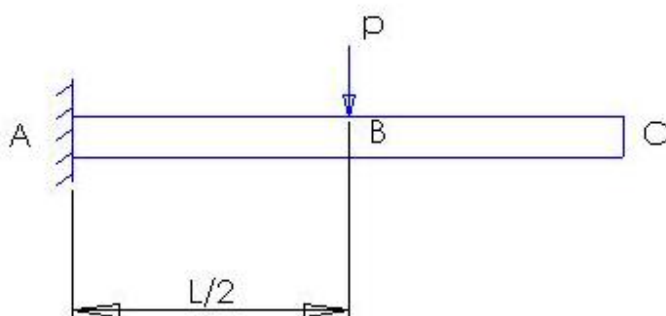


Figura A1: Esquema do problema proposto

Com  $P = 5000 \times 9,81 = 49050 \text{ N}$   
 $L = 15 \text{ m}$

**1º Caso:**



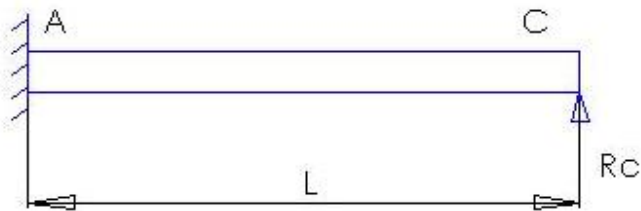
Para este caso temos de assumir que o troço BC permanece rectilíneo sob a acção da força.

$$y_C = y_B + \theta_B \times \frac{L}{2}$$

$$\theta_B = \theta_C = -\frac{p\left(\frac{L}{2}\right)^2}{2EI}$$

$$y_C = -\frac{p\left(\frac{L}{2}\right)^3}{3EI} - \frac{p\left(\frac{L}{2}\right)^2}{2EI} \times \frac{L}{2}$$

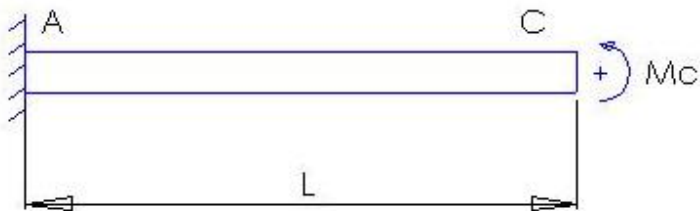
**2º Caso:**



$$\theta_C = \frac{R_C L^2}{2EI}$$

$$y_C = \frac{R_C L^3}{3EI}$$

**3º Caso:**



$$\theta_C = \frac{M_C L}{EI}$$

$$y_C = \frac{M_C L^2}{2EI}$$

Considerando as seguintes condições de fronteira, vem:

$$x = L \rightarrow \theta_C = 0$$



$$0 = -\frac{p\left(\frac{L}{2}\right)^2}{2EI} + \frac{R_C L^2}{2EI} + \frac{M_C L}{EI}$$

$$x = L \rightarrow y_C = 0$$

$$0 = -\frac{p\left(\frac{L}{2}\right)^3}{3EI} - \frac{p\left(\frac{L}{2}\right)^2}{2EI} \times \left(\frac{L}{2}\right) + \frac{R_C L^3}{3EI} + \frac{M_C L^2}{2EI}$$

Resolvendo este sistema de duas equações e duas incógnitas, vem que:

$$R_C = 24525 \text{ N}$$

$$M_C = -91968,75 \text{ Nm}$$

Resolvendo agora as equações de equilíbrio da estática, vem:

$$\sum F_y = 0 \Leftrightarrow R_A - p + R_C$$

$$\sum M_A = 0 \Leftrightarrow M_A + R_C \times L - \frac{L}{2} p - M_C$$

$$R_A = 24525 \text{ N}$$

$$M_A = 91968,75 \text{ Nm}$$

### **Determinação da flecha analiticamente através do método da sobreposição**

Também neste caso as soluções estão tabeladas.

**1º Caso:**

$$y_1 = \frac{p}{6EI} \left( x^3 - 3\frac{L}{2}x^2 \right)$$

**2º Caso:**

$$y_2 = -\frac{R_C}{6EI} (x^3 - 3Lx^2)$$

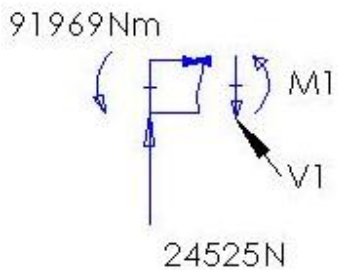
**3º Caso:**

$$y_3 = -\frac{M_C}{2EI} x^2$$

Sobrepondo os resultados, vem que para um  $x = \frac{L}{2}$

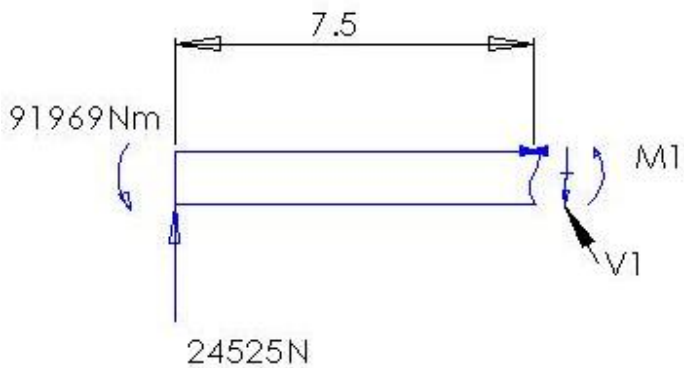
$$y = y_1 + y_2 + y_3 = -0,01476 \text{ m}$$

**Cálculo do esforço transverso e do momento flector ao longo da viga**



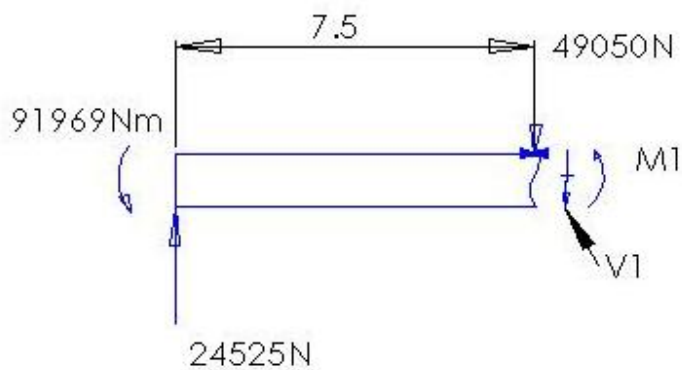
$$\sum F_y = 0 \Leftrightarrow V_1 - 24525 = 0 \Leftrightarrow V_1 = 24525 \text{ N}$$

$$\sum M = 0 \Leftrightarrow M_1 + 91969 - 24525 \times 0 = 0 \Leftrightarrow M_1 = -91969 \text{ Nm}$$



$$\sum F_y = 0 \Leftrightarrow V_1 - 24525 = 0 \Leftrightarrow V_1 = 24525 \text{ N}$$

$$\sum M = 0 \Leftrightarrow M_1 - 24525 \times 7,5 + 91969 = 0 \Leftrightarrow M_1 = 91969 \text{ Nm}$$



$$\sum F_y = 0 \Leftrightarrow V_1 + 49050 - 24525 = 0 \Leftrightarrow V_1 = -24525 \text{ N}$$

$$\sum M = 0 \Leftrightarrow M_1 - 24525 \times 7,5 + 49050 \times 0 + 91969 = 0 \Leftrightarrow M_1 = 91969 \text{ Nm}$$

### Cálculo da tensão

$$\sigma = \frac{My}{I} = \frac{91969 \times 0,2}{292 \times 10^{-6}} = 63 \text{ MPa}$$

### Análise modal

$$\omega = (\beta l)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A l^4}}$$

Para uma viga bi-encastada :  $\beta_1 l = 4,730041$

Então para o nosso caso vem:

$$\omega = (4,730041)^2 \sqrt{\frac{200 \times 10^9 \times 292 \times 10^{-6}}{7850 \times 11800 \times 10^{-6} \times 15^4}} = 78,9 \text{ rad / s}$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = 12,6 \text{ Hz}$$

### Utilização do ANSYS® para resolver o problema proposto

Na resolução do problema em ANSYS, utilizou-se o elemento BEAM 3 e foi modelado o problema com os parâmetros da tabela 7:

Tabela A1: Parâmetros utilizados na modelação em ANSYS

|                          |  |
|--------------------------|--|
| Constantes               | Área=11 800x10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup><br>I <sub>z-z</sub> =292x10 <sup>-6</sup> m <sup>4</sup><br>d=0.4 m<br>ρ=7 860 kg/m <sup>3</sup> |
| Propriedades do material | E=200x10 <sup>9</sup> Pa<br>ν=0.3  |
| Nº de nós                | 3:<br>1 (0,0,0) (m)<br>2 (7.5,0,0) (m)<br>3 (15,0,0) (m)   |
| Nº de elementos          | 2  |
| Carregamentos            | Encastamento nas extremidades<br>49 050 N a meio vão<br>Peso próprio   |

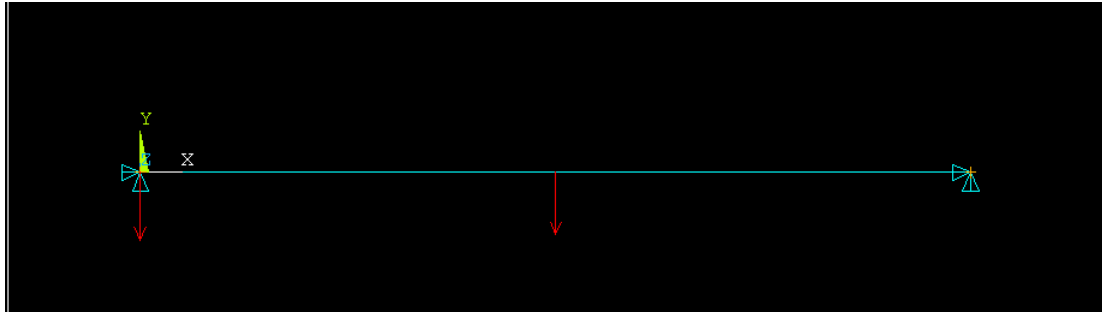


Figura A2: Modelação do problema em ANSYS

## Resultados através do método numérico

### Reacções nos encastramentos:

| NODE | FX     | FY     | MZ      |
|------|--------|--------|---------|
| 1    | 0.0000 | 24525. | 91969.  |
| 3    | 0.0000 | 24525. | -91969. |

### Flecha máxima:

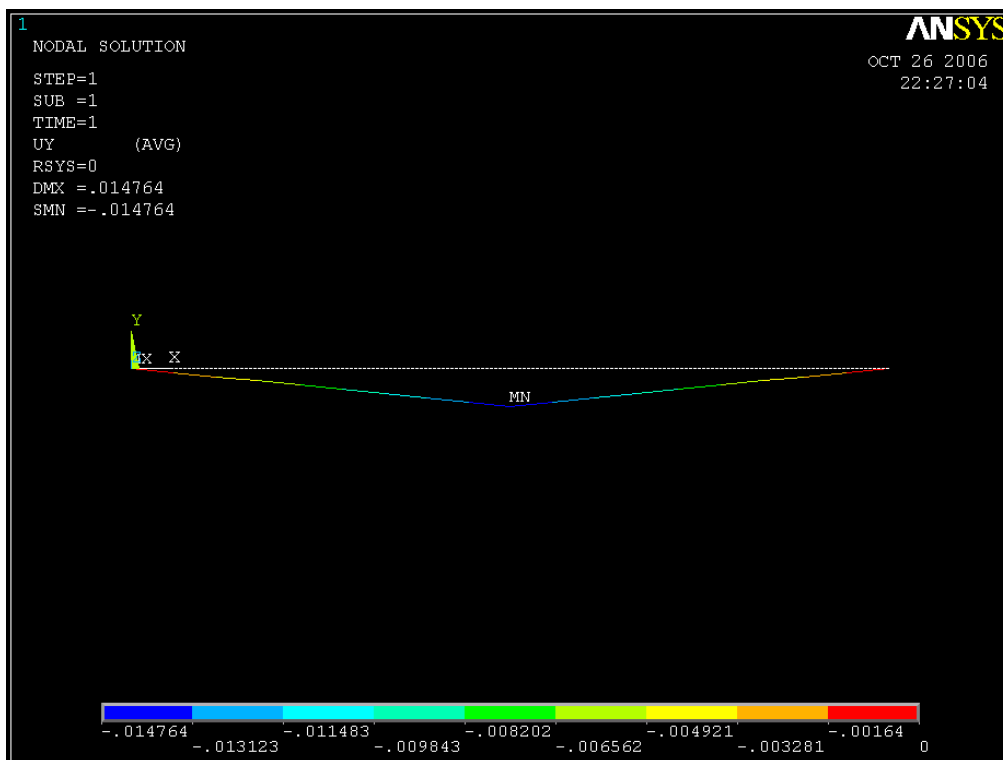


Figura A3: Flecha máxima

## Diagramas de esforço transverso e de momento flector:

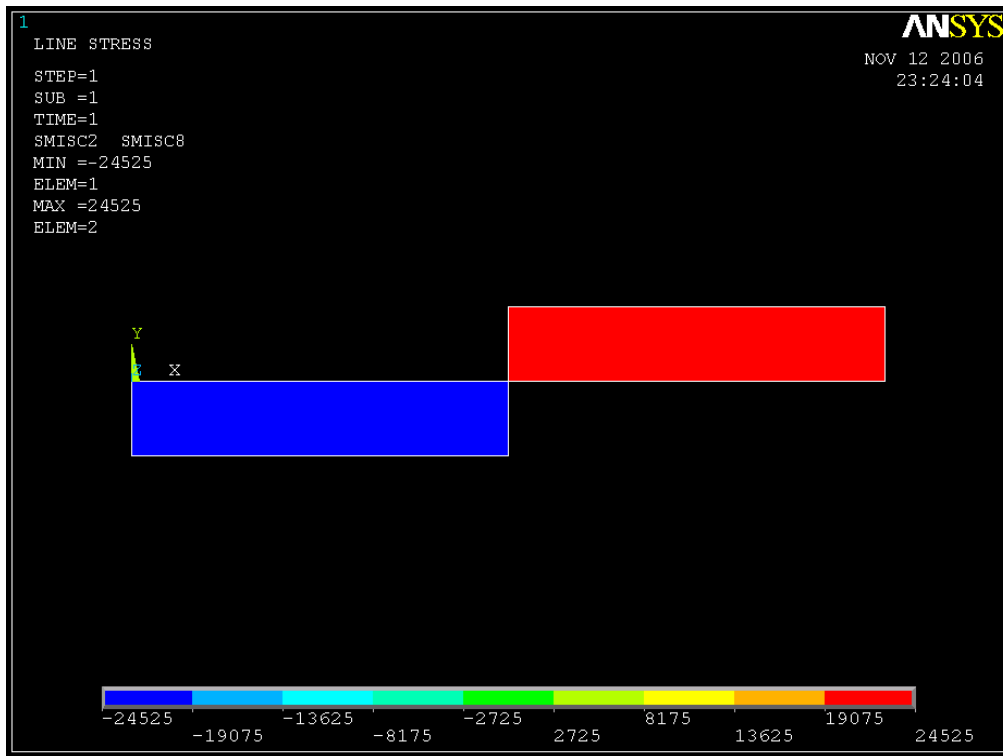


Figura A4: Esforço transverso

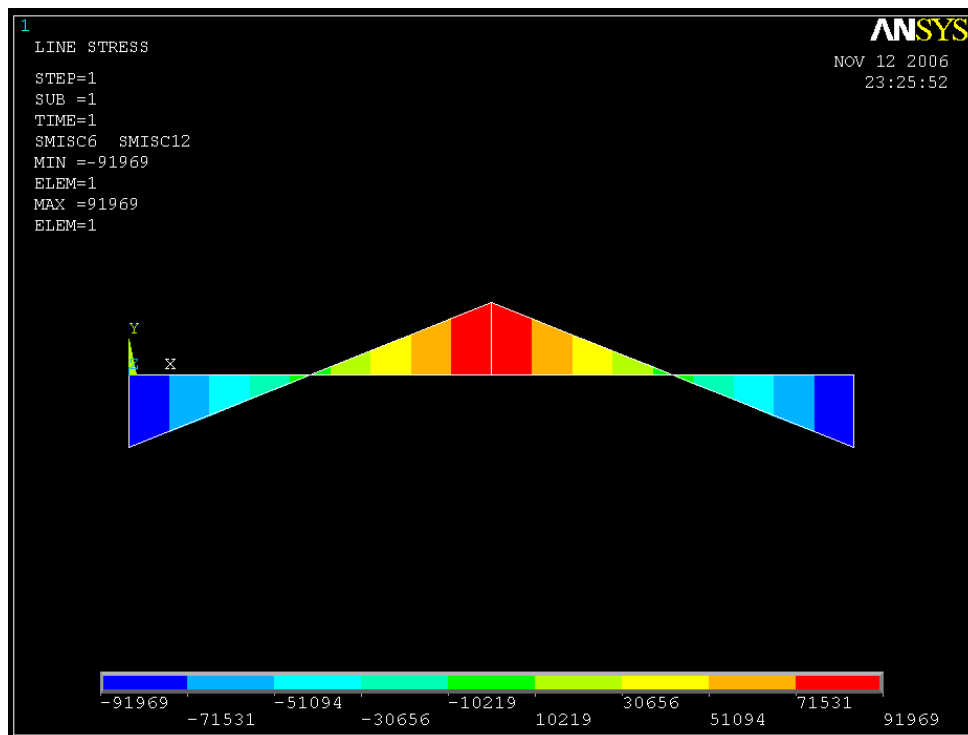


Figura A5: Momento flector

### Tensão máxima na viga:

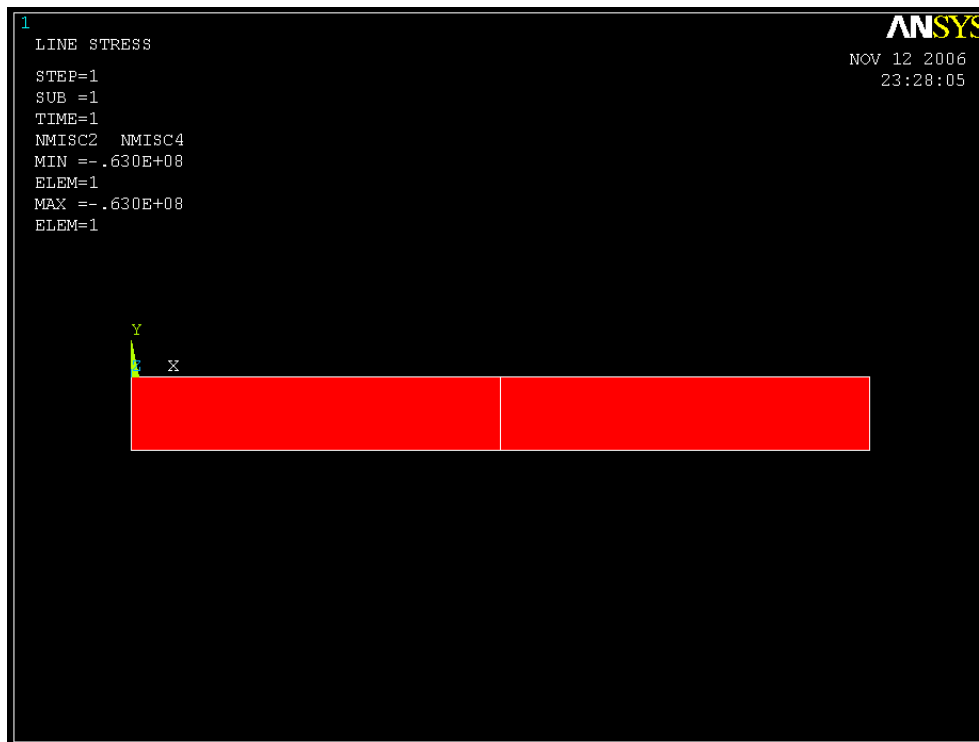


Figura A6: Tensão máxima na viga

### Análise modal

Para a análise modal através do ANSYS, foi utilizado o método dos subespaços e procurámos os dez primeiros modos de vibração com frequências entre os zero e os mil Hz.

| SET | TIME/FREQ | LOAD STEP | SUBSTEP | CUMULATIVE |
|-----|-----------|-----------|---------|------------|
| 1   | 12.753    | 1         | 1       | 1          |
| 2   | 45.872    | 1         | 2       | 1          |
| 3   | 185.41    | 1         | 3       | 1          |

## Anexo C:

Procedimento e cálculos para a validação do método numérico na situação descrita no capítulo 2.5.3.

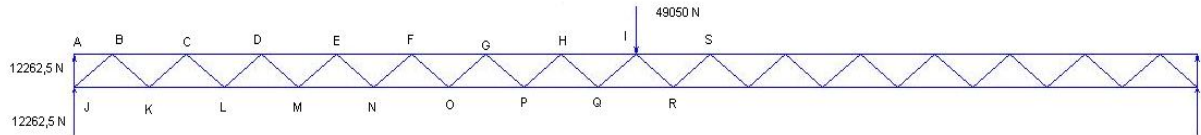
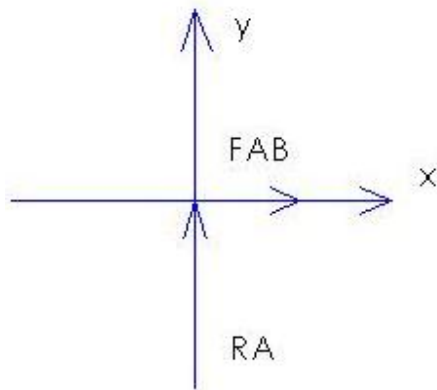


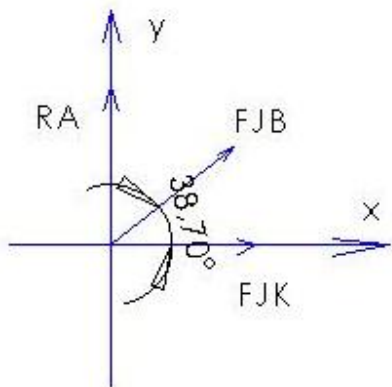
Figura B1: Esquema da situação da estrutura tubular

### Nó A



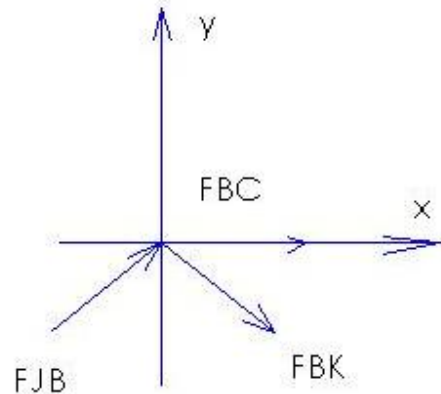
$$\begin{cases} \sum F_x = 0 \Leftrightarrow F_{AB} = 0 \\ \sum F_y = 0 \Leftrightarrow R_A = 12262,5N \end{cases}$$

### Nó J



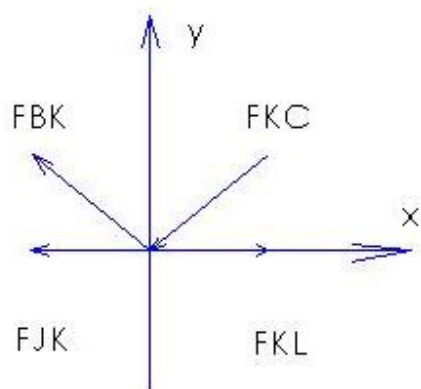
$$\begin{cases} \sum F_x = 0 \Leftrightarrow F_{JK} + F_{JB} \cos 38,7 = 0 \\ \sum F_y = 0 \Leftrightarrow R_A + F_{JB} \sin 38,7 = 0 \\ F_{JK} = 15306,1N(\text{tracção}) \\ F_{JB} = -19612,4N(\text{compressão}) \end{cases}$$

### Nó B



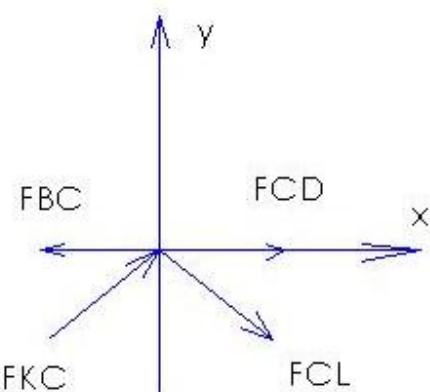
$$\begin{cases} \sum F_x = 0 \Leftrightarrow F_{JB} \cos 38,7 + F_{BC} + F_{BK} \cos 38,7 = 0 \\ \sum F_y = 0 \Leftrightarrow F_{JB} \sin 38,7 - F_{BK} \sin 38,7 = 0 \\ F_{BC} = -39224,8N(\text{compressão}) \\ F_{BK} = 19612,4N(\text{tracção}) \end{cases}$$

### Nó K



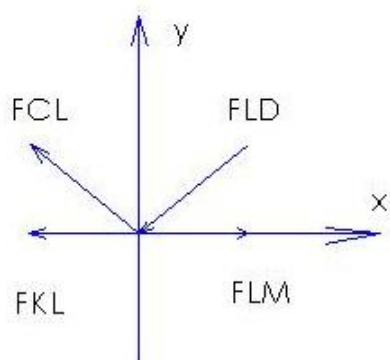
$$\begin{cases} F_{KL} = 45918,3N(\text{tracção}) \\ F_{KC} = 19612,4N(\text{compressão}) \end{cases}$$

### Nó C



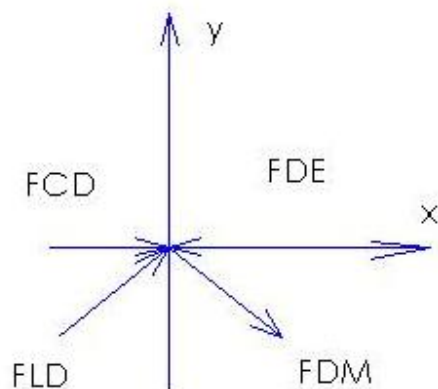
$$\begin{cases} F_{CD} = -45918,3N(\text{compressão}) \\ F_{CL} = 19612,4N(\text{tracção}) \end{cases}$$

### Nó L



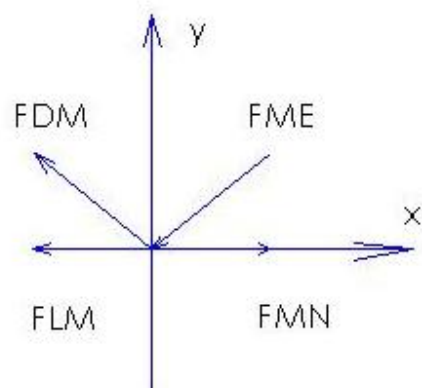
$$\begin{cases} F_{LM} = 76530,5N(\text{tracção}) \\ F_{LD} = 19612,4N(\text{compressão}) \end{cases}$$

### Nó D



$$\begin{cases} F_{DE} = 76530,5N(\text{compressão}) \\ F_{DM} = 19612,4N(\text{tracção}) \end{cases}$$

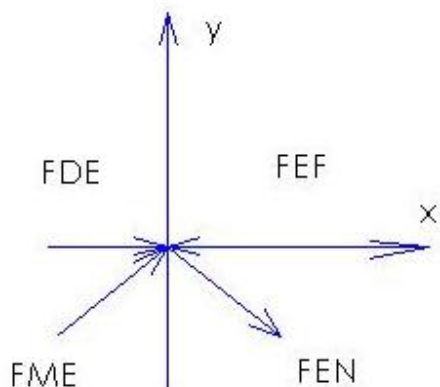
### Nó M



$$\begin{cases} F_{MN} = 107142,7N(\text{tracção}) \\ F_{ME} = 19612,4N(\text{compressão}) \end{cases}$$

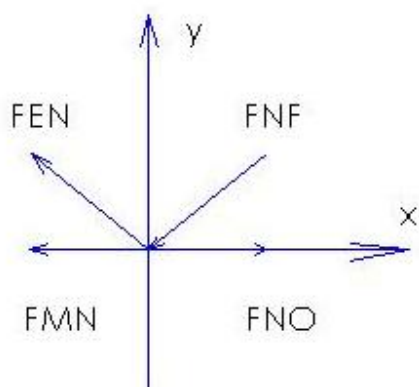


### Nó E



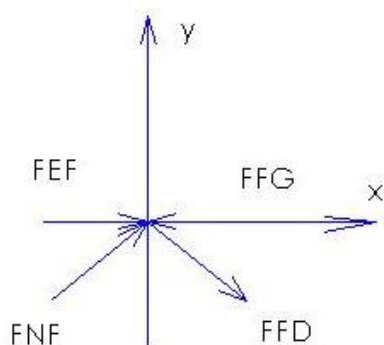
$$\begin{cases} F_{EF} = 107142,7N(\text{compress\~ao}) \\ F_{EN} = 19612,4N(\text{trac\~cao}) \end{cases}$$

### Nó N



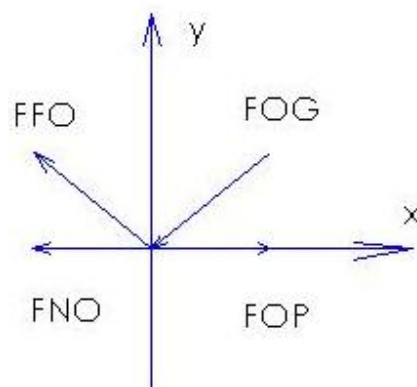
$$\begin{cases} F_{NO} = 137754,9N(\text{trac\~cao}) \\ F_{NF} = 19612,4N(\text{compress\~ao}) \end{cases}$$

### Nó F



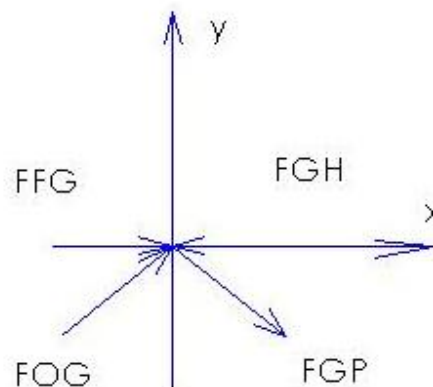
$$\begin{cases} F_{FG} = 137754,9N(\text{compress\~ao}) \\ F_{FO} = 19612,4N(\text{trac\~cao}) \end{cases}$$

### Nó O



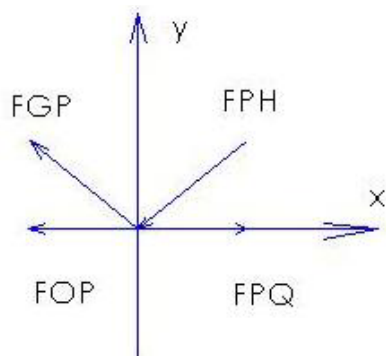
$$\begin{cases} F_{OP} = 168367,1N(\text{trac\~cao}) \\ F_{OG} = 19612,4N(\text{compress\~ao}) \end{cases}$$

### Nó G

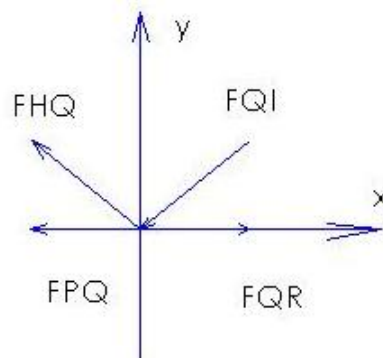


$$\begin{cases} F_{GH} = 168367,1N(\text{compress\~ao}) \\ F_{GP} = 19612,4N(\text{trac\~cao}) \end{cases}$$

### Nó P

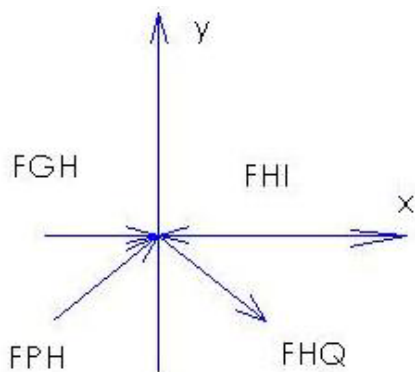


$$\begin{cases} F_{PQ} = 198979,8N(\text{tracção}) \\ F_{PH} = 19612,4N(\text{compressão}) \end{cases}$$



$$\begin{cases} F_{QR} = 229591,5N(\text{tracção}) \\ F_{QI} = 19612,4N(\text{compressão}) \end{cases}$$

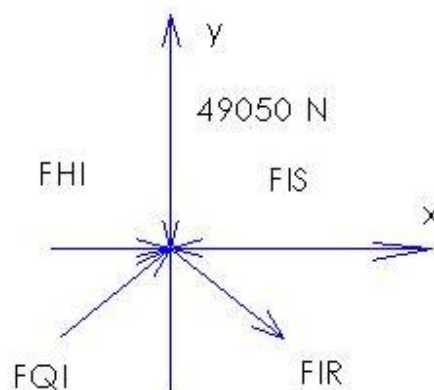
### Nó H



$$\begin{cases} F_{HI} = 198979,3N(\text{compressão}) \\ F_{HQ} = 19612,4N(\text{tracção}) \end{cases}$$

### Nó Q

### Nó I



$$\begin{cases} F_{IS} = F_{HI} = 198979,3N(\text{compressão}) \\ F_{IR} = 39224,8N(\text{compressão}) \end{cases}$$

## Anexo D:

Catálogo de elementos tubulares de MetalsDepot.



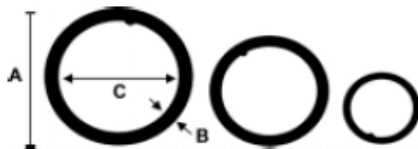
## Carbon Steel

**Order Online!**

Visit [MetalsDepot.com](http://MetalsDepot.com) or Call 1-859-745-2650 for Current Pricing.

|       |      |      |       |           |
|-------|------|------|-------|-----------|
| 1-3/4 | .120 | 1.51 | 2.089 | T2W134120 |
| 2     | .065 | 1.87 | 1.343 | T2W2065   |
| 2     | .120 | 1.76 | 2.409 | T2W2120   |
| 2-1/2 | .065 | 2.37 | 1.690 | T2W212065 |
| 2-1/2 | .120 | 2.28 | 3.050 | T2W212120 |
| 3     | .120 | 2.76 | 3.691 | T2W3120   |
| 4     | .120 | 3.76 | 4.973 | T2W4120   |

### Structural Steel Pipe



A = Structural Pipe, Bare Finish, Plain End - ASTM A500 Gr. B  
B = Pressure Tested Pipe, Coated, Plain End - ASTM A53

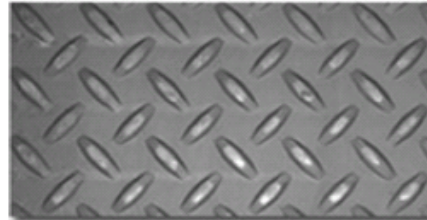
See Material Characteristics & Specifications on Page 4-6

| Ready to Ship! Stock Lengths (+/- 1/4') |                          |                                     |           |
|---|--------------------------|-------------------------------------|-----------|
| 2ft                                     | 4ft                      | 6ft                                 | 8ft       |
| 10ft                                    | 21ft                     | Also Available Custom Cut to Length |           |
| Item Size (inches)<br>A x B x C         | Weight per<br>Foot (lbs) |                                     | Stock No. |
| 1/4" sch 40<br>.540 x .086 x .364       | B                        | .4248                               | T514      |
| 3/8" sch 40<br>.675 x .091 x .493       | B                        | .570                                | T538      |
| 1/2" sch 40<br>.840 x .109 x .622       | A                        | .850                                | T512      |
| 1/2" sch 80<br>.840 x .147 x .546       | B                        | 1.088                               | T51280    |
| 3/4" sch 40<br>1.05 x .113 x .824       | A                        | 1.131                               | T534      |
| 3/4" sch 80<br>1.05 x .154 x .742       | B                        | 1.474                               | T53480    |
| 1" sch 40<br>1.315 x .133 x 1.049       | A                        | 1.679                               | T51       |
| 1" sch 80<br>1.315 x .179 x .957        | B                        | 2.172                               | T5180     |
| 1-1/4" sch 40<br>1.660 x .140 x 1.380   | A                        | 2.273                               | T5114HR   |
| 1-1/2" sch 40<br>1.90 x .145 x 1.61     | A                        | 2.718                               | T5112HR   |
| 1-1/2" sch 80<br>1.90 x .200 x 1.50     | B                        | 3.631                               | T511280   |
| 2" sch 40<br>2.375 x .154 x 2.067       | A                        | 3.653                               | T52       |

|                                       |   |        |         |
|---------------------------------------|---|--------|---------|
| 2" sch 80<br>2.375 x .218 x 1.939     | B | 5.022  | T5280   |
| 2-1/2" sch 40<br>2.875 x .203 x 2.469 | A | 5.793  | T5212   |
| 3" sch 40<br>3.50 x .216 x 3.068      | A | 7.576  | T53     |
| 3" sch 80<br>3.50 x .300 x 2.90       | A | 10.25  | T5380   |
| 3-1/2" sch 40<br>4.00 x .226 x 3.548  | A | 9.109  | T531240 |
| 4" sch 40<br>4.50 x .237 x 4.026      | A | 10.790 | T54     |
| 4" sch 80<br>4.50 x .377 x 3.826      | B | 14.98  | T5480   |
| 5" sch 40<br>5.563 x .258 x 5.047     | A | 14.62  | T55     |
| 6" sch 40<br>6.625 x .280 x 6.065     | A | 18.97  | T56     |
| 6" sch 80<br>6.625 x .432 x 5.751     | B | 28.57  | T5680   |
| 8" sch 40<br>8.625 x .322 x 7.981     | A | 28.55  | T58     |

### Steel Floor Plate

ASTM A786



Raised lug pattern provides maximum skid resistance for running boards, steps, flooring, walkways, platforms, stair treads, trench covers, conveyors, truck runways, etc.

| Ready to Ship! Stock Lengths (+/- 1/4') |                          |           |           |
|---|--------------------------|-----------|-----------|
| 48" x 48"                               | 24" x 96"                | 48" x 96" |           |
| Also Available Custom Cut to Size       |                          |           |           |
| Item Size (inches)<br>Gauge Thickness   | Weight per<br>Foot (lbs) |           | Stock No. |
| 14ga                                    | .075                     | 3.75      | P214G     |
| 11ga                                    | .120                     | 6.16      | P218      |
| 3/16                                    | .188                     | 8.71      | P2316     |
| 1/4                                     | .250                     | 11.26     | P214      |
| 3/8                                     | .375                     | 16.37     | P238      |
| 1/2                                     | .500                     | 21.47     | P212      |

**Any Quantity ... Any Size ... Delivered Anywhere!**

## Anexo E:

Imagens da estrutura actual.









